

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E
AMBIENTAL**

**ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS DE
ATERRO SANITÁRIO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA**

LEONARDO VIRISSIMO NEVES

Trabalho submetido à Banca Examinadora como parte dos requisitos para Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental – TCC II.

Orientador: Prof. Dr. Marlon André Capanema.

Coorientador: Prof. Dr. Armando Borges de Castilhos Junior.

**Florianópolis (SC)
Dezembro, 2015**

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Neves, Leonardo Virissimo

ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS DE ATERRO
SANITÁRIO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA / Leonardo
Virissimo Neves ; orientador, Marlon André Capanema ;
coorientador, Armando Borges de Castilhos Jr. . -
Florianópolis, SC, 2015.

84 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico.
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Inclui referências

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Aterro
Sanitário. 3. Biogás. 4. Energia Elétrica. 5. Deagradção
Anaeróbia. I. , Marlon André Capanema. II. , Armando Borges
de Castilhos Jr.. III. Universidade Federal de Santa
Catarina. Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental.
IV. Título.

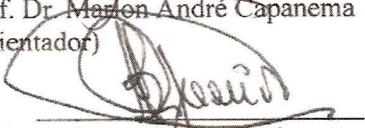
ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS DE ATERRO SANITÁRIO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

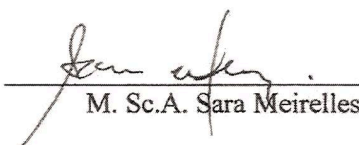
LEONARDO VIRISSIMO NEVES


Trabalho submetido à Banca Examinadora como parte dos requisitos para Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental–TCC II

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. Marlon André Capanema
(Orientador)


Prof. Dr. Armando Borges de
Castilhos Junior (Coorientador)


M. Sc.A. Sara Meirelles


Profª. Drª. Elivete Carmen
Clemente Prim

Florianópolis (SC)
Dezembro/2015



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA
CATARINAUFSC CENTRO TECNOLÓGICOCTC

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA
E AMBIENTAL
ENS

ANÁLISE DO POTENCIAL
ENERGÉTICO DO BIOGÁS DE ATERRO
SANITÁRIO PARA GERAÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA

LEONARDO VIRISSIMO NEVES
ORIENTADOR: MARLON ANDRÉ CAPANEMA
COORIENTADOR: ARMANDO BORGES DE
CASTILHOS JÚNIOR

Distribuição do Texto no CD
Anexar CD Aqui

FLORIANÓPOLIS, (SC)
DEZEMBRO/2015

RESUMO

O biogás é resultado da degradação biológica dos resíduos sólidos quando em situação anaeróbia em aterros sanitários. Ele é constituído principalmente de metano (CH_4) e gás carbônico (CO_2). O metano presente no biogás representa uma fração de 45-75% de sua composição, é um dos principais causadores do efeito estufa e possui alto poder calorífico. Esse alto poder calorífico é um fator importante para que ele seja aproveitado para a geração de energia elétrica. Sendo assim ele passa a ser um fator importante de estudo para que seja possível avaliar as emissões de biogás em aterros sanitários e comprovar sua viabilidade. Este estudo monitorou e avaliou o potencial de geração de biogás do aterro sanitário da cidade de Brusque – Santa Catarina, no intuito de comprovação da viabilidade de aproveitamento de biogás para geração de energia elétrica. Para realizar este estudo foram utilizados como metodologia a análise de vazão e caracterização do biogás em campo, ensaio do potencial de geração de metano (BMP) e por fim, fez uma estimativa teórica da geração do biogás por meio de um software livre, chamado LandGEM. Os resultados obtidos na caracterização do biogás apresentaram uma vazão média de CH_4 igual a $112,13 \text{ Nm}^3/\text{h}$ e uma concentração média de 47,5%. Os ensaios BMP apresentaram resultados médios de $190,6 \text{ NmlCH}_4$ em um período de incubação de 11 dias, o que resultou em um L_0 no valor de $102,54 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{T}_{\text{STV}}$, ou $20,61 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{T}$. Por meio dos resultados obtidos no ensaio BMP realizou-se a modelagem utilizando o software LandGEM. Como resultado o modelo informa que o aterro poderá gerar uma quantidade de metano do ano de abertura (1997) até o ano 2137 uma quantia de $154.817.316,4 \text{ m}^3\text{CH}_4$, com pico de $4.083.382,9 \text{ m}^3\text{CH}_4$ no ano 2032, um ano após o fechamento do aterro informado pela empresa gestora.

Palavras-chave: Biogás. Degradação anaeróbia. Estimativas de geração. Energia.

ABSTRACT

Biogas is the result of biological degradation of solid waste when in anaerobic situation in landfills. It consists primarily of methane (CH₄) and carbon dioxide (CO₂). The methane present in biogas represents a fraction of 45-75% of its composition, is a major cause of the greenhouse effect and has high calorific value. This high calorific value is an important factor for it to be harnessed to generate electricity. Thus it becomes an important factor of study so that you can evaluate the emissions of biogas in landfills and prove its viability. This study monitored and assessed the potential of the landfill biogas generation Brusque - Santa Catarina, in order to prove the feasibility of biogas utilization for generating electricity. To carry out this study, we used as a method flow analysis and characterization of the biogas on, the potential of the test methane generation (BMP) and finally, gave a theoretical estimate of the generation of biogas through a free software called LandGEM . The results obtained in the characterization of biogas showed an average flow of CH₄ equal to 112.13 Nm³ / h and an average concentration of 47.5%. BMP trials showed average results of 190.6 NmlCH₄ in a period of 11 days of incubation, resulting in a L₀ worth 102.54 m³CH₄ / TSTV, or 20.61 m³CH₄ / T. Through the results of the BMP test was conducted using the LandGEM modeling software. As a result the model states that the landfill could generate an amount of methane from the opening year (1997) by the year 2137 an amount of 154,817,316.4 m³CH₄, with peak 4083382.9 m³CH₄ in 2032, a year after closing the landfill informed by the management company.

Keywords: Biogas. Anaerobic degradation. Generating estimates. Energy.

Agradecimentos

Durante toda minha trajetória na Universidade Federal de Santa Catarina contei com apoio de muitas pessoas. Em especial o apoio de familiares. Hoje, ao concluir este trabalho tenho a oportunidade de agradecê-las e demonstrar um pouco do quanto importante foi esse apoio para o meu êxito.

Primeiramente agradeço a toda minha família, em especial a minha mãe, Patrícia, por muitos bons conselhos e por estar sempre presente nas horas difíceis. Agradeço aos meus avôs, Armando e Sueli, que sempre me apoiaram e deram o máximo para que eu mantivesse a cabeça erguida, em busca do sucesso final e da conquista dos objetivos.

Agradeço a minha filha, Ísis, por me oferecer seu belo sorriso sempre ao amanhecer e ao anoitecer e ser uma das principais forças que me motivava diariamente a ir até o fim.

Agradeço ao meu orientador, Marlon, que sempre buscou encontrar soluções aos questionamentos que apareceram no meu caminho e por estar sempre presente em qualquer momento em que foi por mim procurado.

Agradeço ao meu coorientador, Armando, por me ensinar, de forma simples a como resolver problemas de maneira calma e bem pensada.

Agradeço aos colegas Victor e Mariane, por toda participação e contribuição para o desenvolvimento deste trabalho.

A todos os professores que passaram pela minha vida até momento.

Aos colegas de trabalho da Secretaria da Saúde, em especial a Alba, Anísio e Valéria, por me apoiar em minha trajetória na universidade e por disponibilizar sempre que necessário, períodos de tempo para o desenvolvimento deste trabalho e outros em vários momentos do curso.

Aos colegas de trabalho da empresa Compuciclado, Mark, Steven e Denise, por compartilhar muitos conhecimentos em um pequeno intervalo de tempo.

A todos os meus amigos que sempre buscaram manter minha estima em alta.

Um agradecimento póstumo ao meu tio Alexandre, que um dia também sonhou em obter uma graduação e por ser grande fonte de inspiração. Sei que ele estaria orgulhoso.

E por fim, um agradecimento especial a minha esposa, Isadora, pelo apoio incondicional durante todos esses anos. Pela paciência e compreensão em momentos difíceis e por todas as felicidades que me proporciona.

Obrigado.

Lista de Figuras

Figura 1 - Aterro Sanitário	22
Figura 2 - Gráfico Consumo x Potência.....	33
Figura 3 - Gráfico Rendimento x Potência Elétrica	34
Figura 4- Planta Aterro Brusque	36
Figura 5 - Localização Drenos Biogás	37
Figura 6 - Analisador de Gases GEM 5000.....	38
Figura 7 - Termo Anemômetro	40
Figura 8 - Bocal de Fibra e PVC	41
Figura 9 - Campânula Metálica	42
Figura 10 - Exemplo Dreno Biogás.....	43
Figura 11 - Colocação Campânula Metálica no Dreno de Biogás	44
Figura 12 - Acoplamento Bocal de Fibra e PVC.....	45
Figura 13 - Certificação Anti-Vazamentos	46
Figura 14 - Análise e Medição de Biogás	46
Figura 15 - Amostra de Resíduos	47
Figura 16 - Unidade Fixadora de CO ₂ (AMPTS II).....	49
Figura 17 - Unidade Frascos Banho Maria (AMPTS II).....	50
Figura 18 - Unidade Medição de Metano (AMPTS II)	51
Figura 19 - AMPTS II	52
Figura 20 - Gráfico de Vazão do Biogás do Aterro de Brusque.....	57
Figura 21 - Geração CH ₄ Relação 1:1	64
Figura 22 - Geração CH ₄ Relação 1:2	65
Figura 23 - Geração CH ₄ Pelas Amostras "branco"	68
Figura 24 - Volume de CH ₄ Acumulado para a Relação 1:1	69
Figura 25 - Volume de CH ₄ Acumulado para a Relação 1:2.....	69
Figura 26 - Volume de CH ₄ Acumulado Gerado por Amostras Branco	70
Figura 27 - Volume bruto e final de geração de CH ₄ acumulado.....	71
Figura 28 - Resultados Geração Biogás Software LandGEM.....	76

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Valores da constante k em função da precipitação anual.....	30
Tabela 2 - Valores Dosagem BMP	50
Tabela 3 - Concentração Biogás	55
Tabela 4 - Resultados Teor de Umidade	59
Tabela 5 - Resultados Teor Sólidos Voláteis	60
Tabela 6 - Geração de CH ₄ para Relação 1:1	62
Tabela 7 - Tabela 6- Geração de CH ₄ para Relação 2:1	63
Tabela 8 - Análise do pH antes do Experimento BMP	65
Tabela 9 - Análise do pH após Experimento BMP	66
Tabela 10 - Geração CH ₄ Inóculo	67
Tabela 11 - Projeção de Disposição de Resíduos a Partir da Taxa de Crescimento Populacional.....	74
Tabela 12 - Dados de Entradado Software LandGEM.....	75
Tabela 13 - Resultados LandGEM.....	77
Tabela 14 - Emissão de Biogás do ano 2014 a 2137.....	77

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agencia Nacional de Energia Elétrica
BMP	<i>Biochemical Methane Potential</i>
CH ₄	Metano
CO ₂	Gás Carbônico
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
GEE	Gases de Efeito Estufa
H ₂ S	Gás Sulfídrico
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
K	Constante da Taxa de Geração de Metano
LABCET	Laboratório de Combustão e Engenharia de Sistemas Térmicos (UFSC)
LANDGEM	<i>Landfill Gas Emissions Model</i>
LARESO	Laboratório de Pesquisa em Resíduos Sólidos (UFSC)
L ₀	Potencial de Geração de Metano
O ₂	Oxigênio Gasoso
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
STV	Sólidos Totais Voláteis
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
ESMAP	<i>Energy Sector Management Assistance Programme</i>

Sumário

1.	Introdução.....	17
2.	Objetivos.....	19
2.1.	Objetivo Geral.....	19
2.2.	Objetivos Específicos.....	19
3.	Revisão Bibliográfica.....	19
3.1.	Resíduos Sólidos.....	19
3.2.	Aterro Sanitário.....	21
3.3.	Degradação anaeróbia.....	23
3.4.	Biogás.....	24
3.5.	Energia Elétrica Renovável.....	26
3.5.1.	Estimativa Teórica de Produção de Biogás.....	28
3.5.2.	Ensaio Potencial Bioquímico de Metano (Ensaio BMP)	
	30	
4.	Procedimentos Metodológicos.....	31
4.1.	Enquadramento do Trabalho.....	32
4.2.	Aterro Sanitário de Brusque.....	34
4.3.	Caracterização do Biogás em Campo.....	36
4.3.1.	GEM 5000 – Analisador de Gases.....	38
4.3.2.	Termo Anemômetro.....	39
4.3.3.	Bocal de Fibra e PVC.....	41
4.3.4.	Campânula Metálica.....	42
4.3.5.	Procedimentos de Caracterização em Campo.....	43
4.4.	Ensaio BMP.....	47

4.4.1.	Etapas do Ensaio BMP	
4.4.2.	AMPTS II.....	494.5.
	Comparação de Estimativas de Geração	52
5.	Resultados e Discussões	54
5.1.	Caracterização da Emissão do Biogás Gerado no Aterro	54
5.2.	Ensaio BMP.....	58
5.3.	Estimativa Teórica de Geração de Biogás Gerado no Aterro.....	72
6.	Conclusões	78
7.	Referências Bibliográficas	79

1. Introdução

Os aterros sanitários são uma das tecnologias de disposição final de resíduos sólidos mais comuns e mais adotados. No contexto brasileiro atual, cerca de 65% dos resíduos sólidos urbanos são encaminhados a aterros sanitários, o que corresponde a cerca de 78,6 milhões de toneladas (ABRELPE, 2014). Este dado tende a aumentar devido à implantação da Lei 12.305/10 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12305/10), a qual trata de cumprimentos para que todos possam se enquadrar nas determinações.

Em um aterro sanitário pode-se encontrar os mais variados tipos de resíduos sólidos, podendo ser: materiais orgânicos, inorgânicos, inertes e recalcitrantes. Os resíduos, ao chegarem ao aterro, são previamente compactados por máquinas compactadoras e em seguida são enterrados. Um aterro é planejado em células de resíduos, sendo assim, quando uma célula é preenchida com resíduos e devidamente coberta com uma camada de cobertura (intermediária), uma nova célula é iniciada em cima ou ao lado da anterior, formando por fim uma seção piramidal no aterro (ABNT, 1992).

Por meio de atividades microbianas proporcionadas por condições aeróbias e anaeróbias esses materiais são biodegradados, resultando na formação de lixiviados e de biogás. Esse gás resultante da atividade microbiana em meio anaeróbio é composto por uma mistura com cerca de 50% a 60% de metano (CH_4), 40 a 50% dióxido de carbono (CO_2), e outros gases em menores concentrações (Rohstoffe, 2010; Fellenberg, 1980; Schalch, Leite, Fernandes Jr. 2002).

O gás metano é um dos gases causadores do efeito estufa (GEE), e deve ser controlado em aterros sanitários, seja por meio de coleta para geração de energia ou por queima em flares e drenos. Também contribui, em menor proporção, com a destruição da camada de ozônio (Ensinas, 2003).

O poder calorífico do biogás varia de acordo com a quantidade de metano existente em sua composição, atingindo cerca de 4500 a 6000 kcal por metro cúbico, podendo chegar até 12.000 kcal/m^3 , quando retirado o CO_2 . Sendo assim, o biogás gerado em aterros sanitários após passar por um adequado tratamento pode representar uma excelente alternativa de energia renovável (Tolmasquim, 2008; Zago, 2003).

Como a demanda por energia elétrica sempre tende a aumentar, buscar alternativas para complementar a matriz energética e diversificá-

la é sempre muito valorizado. Sendo assim, o aproveitamento do biogás proveniente de aterros sanitários é uma alternativa com grande potencial, pois além de contribuir com a geração de energia também contribui com o meio ambiente, reduzindo a destruição da camada de ozônio e as emissões de gases de efeito estufa.

Este trabalho visa a quantificar a geração de biogás proveniente do aterro sanitário de Brusque (SC), para em seguida avaliar a viabilidade de implantação de um sistema de coleta e tratamento do biogás para geração de energia elétrica. Por fim espera-se comprovar que o biogás proveniente do aterro sanitário em estudo é suficiente para ser aproveitado para geração de energia elétrica.

O trabalho está inserido em um amplo projeto multidisciplinar, e os resultados obtidos neste darão subsídios para instalação de um sistema motor gerador no aterro. Posteriormente, tal sistema irá gerar energia elétrica e contribuir como fonte alternativa para o local. Contribuindo com o meio ambiente e sendo objeto de incentivo a outros aterros de Santa Catarina.

2. Objetivos

2.1. Objetivo Geral

Avaliar a geração de biogás do aterro sanitário de Brusque para futura geração de energia elétrica.

2.2. Objetivos Específicos

- i.** Comparação da produção do biogás através de estudo prático e teórico;
- ii.** Determinação do potencial de geração de metano em bancada;
- iii.** Verificar e comprovar o potencial de aproveitamento energético.

3. Revisão Bibliográfica

3.1. Resíduos Sólidos

Os resíduos sólidos de origem urbana (RSU) compreendem aqueles resíduos produzidos pelas inúmeras atividades desenvolvidas em áreas com aglomerações humanas do município, abrangendo resíduos de várias origens, como residencial, comercial, da limpeza pública (varrição, capina e poda). Dentre os vários RSU gerados, são normalmente encaminhados para a disposição em aterros sob responsabilidade do poder municipal os resíduos de origem domiciliar ou aqueles com características similares, como os comerciais, e os resíduos da limpeza pública (CASTILHOS, 2003).

Segundo a ABRELPE(2014), cerca de 195.233 toneladas de resíduos sólidos por dia foram gerados pela população brasileira no ano de 2014. Para Santa Catarina, a taxa de produção de resíduos sólidos ficou no valor de 4.662 toneladas por dia. Castilhos(2003) afirma que, no Brasil, em média são geradas 260.000 toneladas de resíduos sólidos por dia, o que seria suficiente para produzir cerca de 650.000 toneladas de metano por ano.

Os resíduos sólidos podem ser classificados conforme NBR 10004, da Associação Brasileira de normas Técnicas (ABNT):

Classe I – Perigosos: São aqueles que, em função de suas características intrínsecas de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade, apresentam riscos à saúde pública através do aumento da mortalidade ou da morbidade, ou ainda provocam efeitos adversos ao meio ambiente quando manuseados ou dispostos de forma inadequada;

Classe IIA – Não Inertes: São os resíduos que podem apresentar características de combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade, com possibilidade de acarretar riscos à saúde ou ao meio ambiente, não se enquadrando nas classificações de resíduos Classe I – Perigosos – ou Classe IIB – Inertes;

Classe IIB– Inertes: São aqueles que, por suas características intrínsecas, não oferecem riscos à saúde e ao meio ambiente, e que, quando amostrados de forma representativa, segundo a norma NBR 10.007, e submetidos a um contato estático ou dinâmico com água destilada ou deionizada, a temperatura ambiente, conforme teste de solubilização segundo a norma NBR 10.006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, conforme listagem nº 8 (Anexo H da NBR 10.004), excetuando-se os padrões de aspecto, cor, turbidez e sabor;

Segundo Russo (2003), os resíduos podem ser classificados quanto a sua origem:

- Resíduos Sólidos Domésticos - são os resíduos provenientes de unidades e conjuntos habitacionais;
- Resíduos Sólidos Públicos - são os resíduos resultantes da limpeza das vias públicas, jardins e outros espaços públicos, em geral, incluindo os resíduos contidos em papeiras e outros recipientes com idêntica finalidade;
- Resíduos Sólidos Comerciais - são os resíduos resultantes da atividade de estabelecimentos comerciais, do sector de serviços, da hotelaria ou de estabelecimentos similares de hotelaria, e de estabelecimentos de utilização coletiva que, pela sua natureza ou composição, se possam considerar semelhantes aos resíduos domésticos;

- Resíduos Sólidos Industriais (Equiparáveis a Domésticos) - são os resíduos sólidos resultantes da atividade industrial que, pela sua natureza ou composição, possam ser considerados semelhantes aos resíduos domésticos, conforme constante do art. 7º da Portaria 374/87, de 4 de maio;
- Resíduos Sólidos Hospitalares (Equiparáveis a Domésticos) - são os resíduos sólidos resultantes da atividade de hospitais, centros de saúde, clínicas veterinárias, laboratórios de análise clínicas e outros estabelecimentos similares que, pela sua natureza ou composição, se encontrem abrangidos pelos resíduos do grupo B, conforme constante do nº 4 do Despacho 16/90 do Ministro da Saúde, e se possam considerar semelhantes aos resíduos domésticos;
- Resíduos Sólidos Especiais - são os resíduos sólidos domésticos, comerciais, industriais equiparáveis a urbanos e hospitalares equiparáveis a urbanos que, pelo seu volume, forma, dimensões, outras características físicas, necessitem de ser objeto de remoção especial;
- Entulhos de Obras - são os escombros, terras, restos de demolições e de quaisquer materiais de construção resultantes de obras públicas ou particulares.

3.2. Aterro Sanitário

Segundo Castilhos (2003) aterros sanitários (Figura 1) são hoje, o meio mais utilizado e de menor custo para a disposição final de RSU. Porém, o fato dos resíduos sólidos estarem estocados não quer dizer que estejam inativos. As condições de aterramento, bem como as influências de agentes naturais (intempéries e microrganismos) ativam processos físicos, químicos e biológicos de transformação dos resíduos. Os elementos naturais são dissolvidos, a água desprende finas partículas e o principal responsável pela degradação dos resíduos é a bioconversão da matéria orgânica em formas solúveis e gasosas. Com isto, temos a formação de biogás e de lixiviados.

Como dito anteriormente, no Brasil cerca de 60% dos resíduos sólidos urbanos gerados pela população são encaminhado para aterros sanitários. E este quadro tende a aumentar cada vez mais devido a aplicação da Política Nacional de Resíduos Sólidos – Lei 12.305/10.

Ao chegar ao aterro, os resíduos são depositados na frente de trabalho e previamente compactados por máquinas compactadoras. Em seguida são enterrados. Para seguir este fluxo, os aterros sanitários são planejados em células de resíduos, em que cada célula comporta um número específico de quantidade de resíduos. A partir do momento que esta célula chega ao seu limite ela é devidamente encoberta e enterrada, e outra célula se inicia, podendo ser ao lado ou acima da anterior, formando por fim uma seção piramidal.

Segundo Fonseca (1999), os aterros sanitários (Figura 1) são práticas de dispor os resíduos sólidos no solo, de forma segura e controlada, garantindo a preservação do meio ambiente, a higiene e a saúde pública. Apesar, no entanto, destes sólidos urbanos acumulados em aterros não apresentarem inatividade, quando assim dispostos.

Figura 1 - Aterro Sanitário



Fonte: <http://www.pmf.sc.gov.br>.

A geração de biogás em aterros sanitários é proporcionada devido à atividade microbiológica que acontece no interior do aterro. Quando o oxigênio começa a se esgotar nas células do aterro a atividade anaeróbia começa a ser realizada, proporcionando a geração do biogás. Os três principais grupos de microrganismos atuantes em aterros são os

organismos acetogenos, metanogenos e hidrolisantes – fermentativos. Eles são responsáveis pela produção de ácido acético, de metano e polímeros na produção de gás carbônico.

A geração de gás em aterro sanitário é afetada por diversas variáveis, entre as quais podem ser citadas: natureza dos resíduos, umidade presente nos resíduos, estado físico dos resíduos (tamanho das partículas), pH, temperatura, nutrientes, capacidade-tampão e taxa de oxigenação. Estes fatores é que são responsáveis pelo desenvolvimento do processo de digestão anaeróbia de substratos orgânicos segundo CASTILHOS (2003).

3.3. Degradação anaeróbia

A degradação anaeróbia é uma atividade essencial em aterros sanitários. Com o encerramento e cobertura de células de resíduos o ambiente que fica aterrado começa a sofrer a falta de oxigênio, contribuindo com a proliferação de microrganismos anaeróbios. Estes começam a degradar os resíduos e, como consequência, ocorre formação de biogás e de lixiviados.

A digestão anaeróbia é um processo fermentativo em que a matéria orgânica complexa é degradada a compostos mais simples. A degradação ocorre através da ação de diversos grupos de microrganismos que interagem simultaneamente, até a formação dos produtos finais: gás metano e gás carbônico.

Na ausência de oxigênio ou de agentes oxidantes fortes como o sulfato, nitrato e enxofre, a degradação anaeróbia da matéria orgânica envolve três etapas: hidrólise, acetogênese e metanogênese (MALANCONI, 2012).

Após o resíduo ser depositado em aterros sanitários começa o processo de degradação. Esse processo pode variar muito em função do tempo de início, funcionamento e eficiência de degradação. Levando meses a até anos para ocorrer. Este fato que ocorre devido às necessárias condições para que ocorra um crescimento adequado dos microrganismos, como temperatura, diminuição de oxigênio, temperatura, etc.

A decomposição anaeróbia de resíduos em aterros varia em 4 fases, segundo FARQUAR & ROVERS (1973, *apud* PAES, 2003; POHLAND & GOULD, 1986; MERBACH Jr, 1989):

- **Fase Um** – Aeróbia: logo após o resíduo ser enterrado os microrganismos aeróbios ainda estão presentes no ambiente e começam a executar a degradação. Segundo REES (1980), a duração dessa etapa pode variar de 10 a 100 dias após o aterramento dos resíduos. O resultado dessa atividade é a produção de CO_2 , água e aumento de temperatura interna, cerca de 40 a 45° C;
- **Fase Dois** – Anaeróbia Ácida: como o oxigênio do meio começa a diminuir os microrganismos anaeróbios passam a substituir os aeróbios no processo de decomposição. A primeira fase resultou em glicose, que será também metabolizada nesta fase, resultando em álcoois, ácidos e acetatos. Deste processo acaba ocorrendo geração de gases como hidrogênio e dióxido de carbono, que são liberados para a atmosfera. Nesta fase ocorre diminuição de temperatura, na faixa de 37 a 40° C, sendo que tem duração de cerca de 60 dias;
- **Fase Três** – Anaeróbia Instável: nesta fase os álcoois, acetatos e ácidos são decompostos por outros microrganismos (hidrolíticos e fermentativos). Por consequência, ocorre a formação de acetatos, formatos, hidrogênio, CO_2 e pequenas quantidades de metano. Esta fase pode durar até oito anos, devido à falta de condições ideais do meio. A temperatura é cerca de 37° C;
- **Fase Quatro** – Metanogênica Estável: Devido à transformação dos acetatos, formatos e dióxido de carbono produzido na terceira fase por microrganismos metanogênicos, o processo se completa. Há ocorrência de formação de CH_4 e CO_2 em grandes quantidades. O biogás gerado nesta etapa tem composição de cerca de 40% de dióxido de carbono e 60% de metano.

3.4. Biogás

A matéria orgânica quando decomposta biologicamente em meio anaeróbio origina uma mistura gasosa chamada de biogás. Tal processo é frequente e comum na natureza, ocorre, por exemplo, em pântanos, rúmen de animais ruminantes, mangues, etc. Por meio de diversos microrganismos, a matéria orgânica é convertida em biogás quase por completo (ROHSTOFFE, 2010).

O biogás de aterros é composto por vários gases, principalmente CO_2 e CH_4 que são gases causadores do efeito estufa. No Brasil segundo estimativas apresentadas pelo MCT (2009), as emissões de CH_4 do setor de tratamento de resíduos no ano de 2000 e 2005 foram de 1177 Gg e 1482 Gg, respectivamente, apresentando um crescimento de aproximadamente 20% na emissão deste gás ao longo desses anos. Devido a isto e ao fato de o CH_4 possuir um elevado potencial energético, diversos incentivos sociais e econômicos têm sido desenvolvidos para viabilizar o aproveitamento energético do biogás de aterros e a minimização da emissão de metano para a atmosfera (FIRMO, 2008).

Segundo Filho (2005), os fatores que afetam a geração de gases em aterros sanitários são:

- **Composição** – Quanto maior a porcentagem de materiais biodegradáveis maior será a taxa de geração de gases;
- **Umidade** – Em muitos aterros é o fator mais significativo para a taxa de produção de biogás. Quanto maior o teor de umidade, maior será a taxa de produção de biogás;
- **Tamanho das Partículas** – Quanto menor a unidade ou partícula do resíduo disposto, maior será a área da superfície específica. Ou seja, quanto menor for o resíduo, mais rápido ele irá se decompor;
- **Idade do Resíduo** – em um aterro a geração de biogás possui duas variáveis dependentes do tempo: o tempo de atraso, que corresponde ao tempo em que o resíduo foi disposto até o início da geração de metano deste resíduo; e o tempo de conversão, que trata do tempo que o resíduo foi disposto até o fim da geração de metano deste resíduo;
- **pH** – Para a maioria das bactérias a faixa de pH ótimo é de 6,7 a 7,5 ou próximo do neutro. Dentro dessa faixa, a produção de biogás é maximizada. Fora dela, é limitada;
- **Temperatura** – A temperatura ótima para a produção de biogás é entre 30 a 45° C. As temperaturas típicas do biogás produzido variam entre 30 a 65° C;
- **Outros Fatores** – Nutrientes, bactérias, potencial oxidação-redução (área e profundidade), operação do aterro e processamento de resíduos variáveis.

Segundo Castilhos (2003), a produção teórica de biogás pode ser estimada por meio da formulação de hipóteses sobre a composição

química dos resíduos sólidos urbanos, e pela aplicação da equação de Buswell para a metanogênese de forma estequiométrica. No entanto, modelos matemáticos foram igualmente desenvolvidos para descrever a produção de biogás em aterros sanitários. Esses modelos são formulados essencialmente sobre técnicas usuais de ajuste de curvas teóricas sobre resultados experimentais.

As diferentes utilizações possíveis para o biogás de aterro sanitário dependem da adequação entre as características da produção (vazão, pressão, regularidade, concentração) e as condições impostas pelo utilitário desses gases. Os modelos matemáticos são ferramentas úteis e econômicas para avaliar o potencial de geração de biogás em um aterro, pois seus resultados podem ser utilizados na avaliação do potencial de emissões e da viabilidade de projetos de gestão do gás (ESMAP, 2004).

3.5. Energia Elétrica Renovável

Devido ao processo de degradação anaeróbia em aterros sanitários, estes são potenciais fontes de geração de energia. Isso se dá pelo fato de o aterro sanitário ser equiparável a um reator biológico, gerando um combustível com alto poder calorífico, capaz de realizar trabalho e conversão de energia cinética em energia elétrica.

Segundo o Ministério de Minas e Energia (STANO Jr, 2007), a energia elétrica é a energia proporcionada pelo movimento de elétrons em um condutor. Não é possível enxergá-la, mas ela é uma das formas de energia mais versáteis, porque ela é relativamente fácil de transmitir e utilizar.

Utilizando a tecnologia de digestão anaeróbia, para geração de energia proveniente do biogás é necessário uso apenas de resíduos orgânicos. Sendo assim, estes devem ser separados dos demais e deve ser processado. Essa alternativa, se executada corretamente ao fim apresentará um composto orgânico que pode ser usado como biofertilizante. O potencial é calculado com base na relação de 5.500 m³ de metano para cada 100 toneladas diárias de lixo orgânico, ou 55 m³/t conservados perante o fator de 120 m³/t proposto pela Kompogas (2008), com tempo de residência de dezoito dias. A eficiência de conversão elétrica considerada foi de 33%.

A partir desses valores e com o poder calorífico do metano, sendo 36 MJ/m³, sua produção específica por tonelada de RSU é 0,109

MWh/t. Mas este resultado desconsidera a energia conservada com recicláveis segregados, levando em consideração que somente a matéria orgânica é biodigerida.

As energias renováveis são provenientes de ciclos naturais de conversão da radiação solar, fonte primária de quase toda energia disponível na Terra e, por isso, são praticamente inesgotáveis e não alteram o balanço térmico do planeta e se configuram como um conjunto de fontes de energia que podem ser chamadas de não convencionais, ou seja, aquelas não baseadas nos combustíveis fósseis e grandes hidroelétricas. Atualmente, tem-se procurado mais apropriadamente usar as denominações Energias Renováveis e Novas Energias, para delimitar o conceito naquelas com ciclos de renovação natural, que, em última análise, se originam da energia solar como fonte primária. Incluem-se nesta categoria a energia eólica, de biomassa e a solar, que são formas de energia que se regeneram de maneira cíclica em uma escala de tempo reduzida segundo Pacheco (2006).

Por conta do grande potencial hídrico disponível no Brasil a matriz energética se concentrou na geração de energia elétrica a partir apenas dessa fonte renovável, chegando a corresponder cerca de 90% da geração do país (ANEEL, 2002). Com isso as outras fontes acabam obtendo pouca atenção devido ao seu custo de implementação e beneficiamento, como a energia proveniente do biogás. Esse fato se dá pelos grandes custos de implantação do sistema de geração de energia a partir dessas fontes; demorado ou insuficiente retorno financeiro; limitadas fontes de pesquisa e restrições de barreiras igualitárias.

Os investimentos em energia renovável apresentam, em sua maioria, custos superiores aos necessários para a adoção de fontes tradicionais. Não obstante, invariavelmente as energias renováveis trazem consigo externalidades positivas passíveis de serem mensuradas, como o desenvolvimento das áreas econômica e social. Adicionalmente, investimentos na geração de energia que se utiliza do biogás como fonte de combustível podem ser viáveis economicamente devido à apropriação de receitas oriundas da venda da energia elétrica e da comercialização dos créditos de carbono (MMA, 2007).

Dessa forma, incentivos públicos são essenciais para a implantação de projetos para geração de energia a partir do biogás, já que terá respaldo do desenvolvimento sustentável. Sendo assim, sob ótica de RSU, o município que presta serviço de limpeza urbana e coleta de resíduos sólidos pode propor alternativas como:

- Explorar diretamente a utilização desses resíduos na atividade de geração de eletricidade a partir da queima do biogás, assumindo o papel de empreendedor;
- Conceder a terceiros, por meio do devido processo legal (licitação), o direito de utilizar os resíduos sólidos. O papel da municipalidade neste caso restringe-se ao de conceder o direito de exploração, por terceiros, dos resíduos sólidos ou da fração orgânica desses resíduos, uma vez que a concessão, autorização ou permissão dos serviços de eletricidade, entre os quais se inclui a geração de energia elétrica, é de competência federal (União).

O objetivo principal desses incentivos será o aproveitamento energético do biogás produzido pela degradação dos resíduos por microorganismos para convertê-lo em uma forma de energia útil, como a elétrica e térmica. Atualmente existem diversos projetos de aproveitamento energético proveniente do biogás no Brasil, por exemplo, dos aterros Bandeirantes e São João, no município de São Paulo, que já estão produzindo energia elétrica (MMA, 2007). Em Santa Catarina, o único aterro que já possui sistema de tratamento e aproveitamento de biogás fica no município de Itajaí, Aterro de Canhanduba.

3.5.1. Estimativa Teórica de Produção de Biogás

Para se obter as estimativas de geração do biogás geralmente se utiliza modelos cinéticos de primeira ordem para estimar a produção de metano. Adaptado para aterros, com dados específicos por uma série de suposições sobre as condições do local, o modelo de decaimento de primeira ordem mais usado e aceito pela indústria e agências reguladoras é o modelo LandGEM, com interfase e uso simples e eficiente. Este modelo se baseia na suposição de que há uma fração constante de material biodegradável no aterro por unidade de tempo, conforme apresentado na equação 1.

$$Q(\text{CH}_4)_i = k L_o m_i e^{-kt_i} \quad (1)$$

Onde:

$Q_{(CH_4)i}$ = metano produzido no ano i a partir da seção i do resíduo;

k = Constante de geração de metano;

L_o = Potencial da geração de metano;

m_i = Massa de resíduo despejada no ano i ;

t_i = anos após o fechamento

Esta equação é base de todo o modelo. Por meio dela o modelo consegue prever a geração de metano ao longo de um determinado tempo em função da constante (k) de geração de metano, do potencial de geração de metano (L_o), dos registros históricos de deposição de resíduos e das projeções futuras de resíduos em um aterro.

Porém, esses parâmetros de entrada devem ser previamente selecionados de acordo com as condições do local de estudo já estabelecidas. Por exemplo, na América Latina e Caribe, as diferenças no teor de matéria orgânica dos resíduos, a presença de umidade, ou o nível de compactação do lixo variam e, na maioria dos casos, é o fator que aumenta o potencial de geração de biogás, quando comparado com as condições encontradas na América do Norte e Europa (ESMAP, 2004).

A constante (k) é função de fatores de disponibilidade de nutrientes, pH, temperatura e umidade. Os valores que podem ser utilizados podem variar de 0,01 ano⁻¹ a 0,09 ano⁻¹ segundo Quian (2002).

Um dos teores de maior influência na geração de biogás em um aterro sanitário é a umidade. Esse teor de umidade pode ser influenciado por diferentes motivos, como quantidade e periodicidade das precipitações da região, teor de infiltração da precipitação nas camadas de resíduo, tipo de cobertura diária utilizada, permeabilidade das células de resíduo, etc. Observando o parâmetro de umidade, os valores de k para regiões com intervalo de precipitação entre 500 mm a 1000 mm é 0,05 (Tabela 1) (USEPA, 1994; ESMAP, 2004).

Tabela 1 - Valores da constante k em função da precipitação anual

Precipitação anual	Tipos de materiais dispostos		
	Relativamente Inerte	Moderadamente degradavel	Altamente degradavel
<250 mm	0,01	0,02	0,03
>250 até <500mm	0,01	0,03	0,05
>500 até 1.000mm	0,02	0,05	0,08
>1000mm	0,02	0,06	0,09

Fonte: (ESMAP, 2004; WOLRD BANC, 2003)

O valor potencial de geração de metano (L_0) depende da composição e das características dos resíduos. Os valores podem variar de 125 m³ a 310 m³ por tonelada de resíduo. Este valor irá representar o potencial de geração de metano por tonelada de resíduo.

De acordo com os valores propostos para L_0 e k, o software LandGEM permite que o usuário possa selecionar os valores a serem utilizados no experimento desejado. Para que isso seja possível deve-se conhecer inicialmente as características dos resíduos do aterro, do próprio aterro e do clima da região (ESMAP,2004). Posteriormente, deve-se calcular os valores de L_0 e k para a situação em que se encontra o local de estudo.

3.5.2. Ensaio Potencial Bioquímico de Metano (Ensaio BMP)

De acordo com o tópico 3.5.1, para determinar o potencial de geração de biogás de um aterro existem formulações experimentais. Essas formulações consideram as medições do biogás gerado, e para isso, utilizam-se medições obtidas a partir de ensaios com digestores laboratoriais ou células experimentais (JUCÁ et. al, 2005; ALVES, 2008).

O procedimento atualmente mais utilizado para a realização do ensaio BMP consiste na utilização de uma pequena fração de resíduo, previamente cortada e triturada, colocada em um frasco de vidro e inoculada com uma fração de lodo de digestor aeróbio proveniente de estações de tratamento de esgoto (ETE). Esse inóculo é utilizado para promover a aceleração da degradação dos resíduos e mantida a

viabilidade das metanogênicas. O ambiente no interior de cada frasco é mantido em condições anaeróbias por meio de uma recirculação de uma mistura gasosa (CO_2/N_2) nos recipientes. Em seguida, o frasco é incubado por um determinado período sob condição de temperatura pré-estabelecida. O volume de gás produzido é monitorado por sensores de pressão contidos na tampa de cada recipiente. A concentração de CH_4 e CO_2 é obtida a partir de cromatografia gasosa (ALVES, 2008).

O ensaio apresenta valores em mililitros de CH_4 , ou volume de biogás por grama de resíduo (Nml/g ou Nm^3/t). No ensaio BMP não existe padronização oficial para a metodologia aplicada. As alterações e decisões significativas do ensaio referem-se à características da amostra (tipo, quantidade, etc) ao inóculo, à técnica de medição de biogás e ao período de incubação. Mais de 90% da produção de gases ocorre entre 30 e 60 dias no ensaio Segundo Palmissano & Barlaz (1996); Alves (2008).

Segundo Alves et al. (1995), é de extrema importância definir e padronizar métodos de medição de atividades metanogênicas para que os valores possam ser comparados com mais exatidão. Esses ensaios são muito eficientes no que trata de resultados apresentados em escala laboratorial a medição de atividades e toxicidade do processo de biodegradação. Por mais que este ensaio necessite de um longo intervalo de tempo (30 à 60 dias) para sua execução ainda, é considerado muito prático e útil de acordo com os resultados apresentados.

4. Procedimentos Metodológicos

Neste trabalho a metodologia foi planejada de acordo com as seguintes etapas:

1 – Análise em campo e levantamento de dados através de medições do biogás gerado no aterro;

2 – Ensaio BMP realizado em laboratório sendo utilizada uma amostra dos resíduos do próprio aterro em questão;

3 – Estimativa teórica da geração do biogás do aterro sanitário.

A primeira etapa foi baseada na análise do biogás em campo utilizando equipamentos e metodologia específica. Essa atividade foi

executada com o intuito de comparação com a estimativa teórica (etapa 3) com a prática ao fim de todo o processo.

Em paralelo, foi feito o ensaio BMP, que consiste em uma análise laboratorial da geração de metano por massa de resíduo. Por meio dessa análise foi possível determinar o potencial de geração de metano (L_0), para a amostra do resíduo retirada do aterro.

Ao fim destas duas etapas foi realizada uma estimativa teórica da geração de biogás por meio de um software específico, o LandGEM, que é reconhecido por entidades científicas. O software estima a geração de biogás desde a criação do aterro até o ano de expectativa de seu fechamento.

4.1. Enquadramento do Trabalho

Este trabalho tem seu planejamento e envolvimento em um macro projeto sobre o tema de geração de biogás, e é financiado pela Financiadora de Estudos e Projetos(FINEP). O projeto visa abordar o biogás desde sua captação, passando pelo tratamento para geração de energia, para por fim distribuir em rede comunitária.

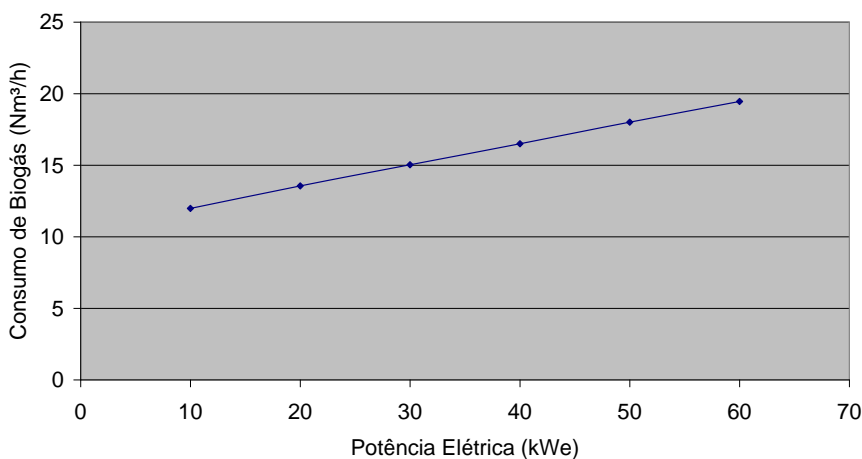
O laboratório responsável pela criação e desenvolvimento do motor para conversão do biogás em energia é o LabCET/UFSC (Laboratório de Combustão e Engenharia de Sistemas Térmicos).

Além da verificação da vazão do biogás, um motor foi desenvolvido para poder realizar a tarefa de transformar o biogás em energia elétrica. As características dele consistem em um motor do tipo ciclo de Otto, modelo v8 de 5,7 litros, fornecido pela GM Powertrain. É estacionário, e fica acoplado a um gerador elétrico WEG 200SI17 de 74 kVA, sendo fornecido pela WEG Máquinas S. A. este motor é composto por um painel elétrico com um módulo DGP 220 que faz o controle de rotação do motor, fornecido pela Woodward Governor Ltda. E ainda um módulo GCP – 22, que controla e monitora as funções de operação do motor.

Este motor foi inicialmente testado em laboratório e era alimentado com GNV (Gás Natural Veicular), com avaliação de alguns parâmetros de seu efetivo desempenho como curva potência x reação, potência x rendimento e potência x consumo. Após esta etapa em laboratório o motor foi instalado em uma propriedade de criação de suínos, ao qual era propriedade da Copercampos, da Cooperativa de Campos Novos.

Por meio do gráfico da Figura 9 pode-se observar o consumo de biogás em função da potencia disponibilizada para a rede. Os valores foram obtidos pela média de dados levantados de quatro medições realizadas para potencia elétrica gerada entre 10 e 60 kWe. Conclui-se que o gerador elétrico possui rendimento de 90%.

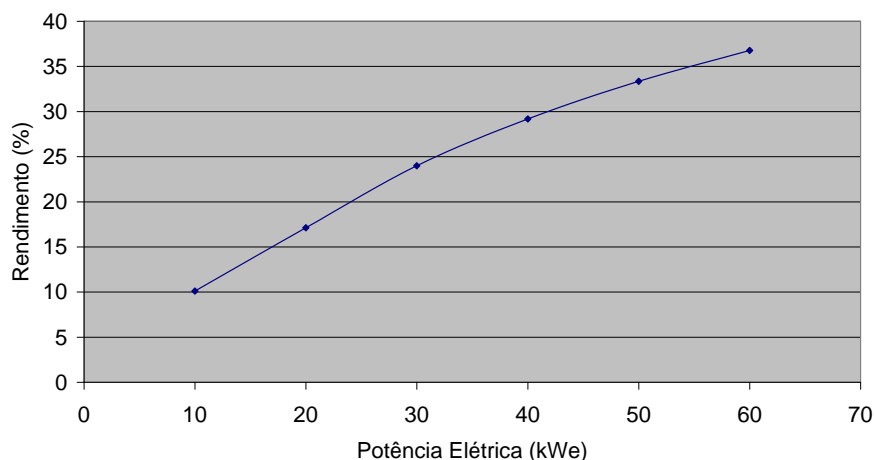
Figura 2 - Gráfico Consumo x Potência



Fonte: LabCET/UFSC

O rendimento é exposto no gráfico da Figura 10, sendo rendimento do motor em função da potencia elétrica fornecida pela rede.

Figura 3 - Gráfico Rendimento x Potência Elétrica



Fonte: LabCET/UFSC

O comportamento do protótipo do motor operando com biogás gerado na criação de suínos foi excelente, segundo os pesquisadores do LabCET. Com uma potencia máxima atingida de 70 kWe o motor superou 25% a potencia esperada para a utilização do biogás. Operando com biogás o rendimento do motor se apresentou melhor do que quando operando com GNV.

Quando este motor for instalado no aterro sanitário de Brusque deverá ser abastecido com pelo menos 19 Nm³/h de biogás, a concentração de CH₄ 60%, ou seja 11,4 Nm³CH₄/h para promover uma geração de 60 kWh.

4.2. Aterro Sanitário de Brusque

O aterro sanitário iniciou suas atividades em 1997 e está localizado na zona rural do município de Brusque, na região chamada de “fazenda”, atendendo mais de sete municípios da região. São eles: Município de Araquari, Balneário Piçarras, Barra Velha, Brusque, Guabiruba, Navegantes e Penha. Somando a população destes municípios temos um valor correspondente a cerca de 300.000 pessoas. Essas pessoas enviam cerca de 600 toneladas de resíduos sólidos

urbanos ao aterro por dia. Atualmente encontra-se no aterro cerca de 1.160.000 toneladas de resíduos já depositados e sua expectativa de atendimento ao mercado é por mais 16 anos, ou seja, até 2031.

O funcionamento do aterro consiste no seguinte processo: os resíduos chegam ao aterro em caminhões basculantes, são pesados e descarregados na parcela ativa do aterro, ou seja, diretamente na frente de trabalho; em seguida, máquinas compactadoras compactam os resíduos para diminuir o volume e organizar as células do aterro, que são preenchidas em forma piramidal.

No aterro existe uma companhia de reciclagem, com um quadro de funcionários para fazer a seleção dos resíduos antes de serem dispostos. Apenas uma parcela dos resíduos passam por estes selecionadores. Vale ressaltar que a cidade não possui sistema de coleta seletiva, sendo assim, os resíduos manuseados por este pessoal são totalmente misturados.

No aterro, para se enquadrar às legislações ambientais pertinentes se faz todo o serviço de impermeabilização de base, drenagem e tratamento do lixiviado, drenagem das águas pluviais e tratamento dos gases, realizada por queima do biogás. Também realiza-se serviço de compactação e cobertura de resíduos.

Para o tratamento do biogás o aterro dispõe de 23 drenos distribuídos em uma área com 117.182 m² como pode ser observado na Figura 2. O biogás canalizado nestes drenos é totalmente queimado, não sendo aproveitado em nenhuma situação.

4.3. Caracterização do Biogás em Campo

36

Figura 5 - Localização Drenos Biogás



Fonte: Acervo próprio.

Para realizar essa atividade os aparelhos e máquinas que foram utilizados, foram:

- GEM 5000 – Analisador de Gases
- Termo Anemômetro Digital Dwyer
- Campânula Metálica
- Retroescavadeira
- Bocal de Fibra de Vidro

4.3.1. GEM 5000 – Analisador de Gases

Para analisar as concentrações do biogás utilizou-se o aparelho chamado GEM 5000 (Landtec), (Figura 4), o qual foi desenvolvido especificamente para monitorar sistemas de extração de gases de aterros sanitários. O aparelho realiza medições em porcentagem (% v/v), de pressões estáticas e diferenciais para CH₄, CO₂, O₂, CO. O H₂S é medido em partes por milhão (ppm).

Figura 6 - Analisador de Gases GEM 5000



Seu funcionamento é composto por uma bomba interna que retira amostras de gases com uma vazão máxima de 0,5 m³/s e analisa os elementos do biogás. É um aparelho portátil, sua leitura de dados é realizada por duas mangueiras e dois filtros e uma sonda (termopar) com encaixe específico e engates rápidos. Ao conectar as mangueiras e o termopar, primeiramente o aparelho faz a purga para limpeza dos tubos e da bomba contida em seu interior; em seguida, selecionando a função

desejada à bomba de vácuo do aparelho, ocorre a sucção do biogás amostrado em intervalos constantes. Quando os dados estabilizam, os valores obtidos são armazenados na memória do aparelho e registrados em planilha.

Seu funcionamento de forma detalhada consiste em frequências de absorção de feixes de luz. A leitura de metano é filtrada por uma frequência de absorção infravermelha de 3,41 μm (nominal), que é a frequência específica para cadeias de hidrocarbonetos. A leitura de dióxido de carbono é filtrada por uma frequência de absorção infravermelha de 4,29 μm (nominal), que é a frequência específica para dióxido de carbono. Portanto, quaisquer outros gases geralmente encontrados em aterros sanitários não afetarão a leitura do dióxido de carbono.

O sensor de oxigênio é de um tipo de célula galvânica que praticamente não sofre influência de CO_2 , CO , H_2S , NO_2 , SO_2 e H_2 , diferentemente de muitos outros tipos de célula de oxigênio. Não há “contaminação” dos sensores infravermelhos por outros hidrocarbonetos. O funcionamento normal do instrumento retorna assim que a amostra de gás tiver sido eliminada, através da purga. Na mangueira de coleta de gases é acoplado um pequeno filtro para evitar que partículas sólidas e umidade penetrem no equipamento ocasionando possíveis problemas operacionais.

4.3.2. Termo Anemômetro

O equipamento utilizado para medir velocidade de escoamento e temperatura do biogás chama-se termo anemômetro. O aparelho foi desenvolvido pela Dwyer, modelo 471-2 (Figura 5), possui duas funções específicas: medir o fluxo do ar por quatro escalas selecionáveis, em pés por minuto ou metros por segundo; e medir a temperatura do ambiente, em $^{\circ}\text{F}$ ou $^{\circ}\text{C}$.

Figura 7 - Termo Anemômetro



A partir dos dados de velocidade e temperatura obtidos pelo termo anemômetro, é possível determinar a vazão do biogás monitorado. Este aparelho é acoplado ao bocal de fibra e PVC para realização da análise. Os dados analisados por este aparelho são dispostos em metros por segundo (m/s). Utilizando a equação 2 abaixo o dado pode ser convertido em m³/h.

$$Q = (V * A) * \left[\frac{273,15}{237,15 + T} \right] * P \quad (2)$$

Em que:

- Q -vazão de biogás, em m³/s;
- V - velocidade de saída do biogás, em m/s;
- A - área da seção de passagem do gás, em m²;
- T - temperatura de saída do biogás, em °C;
- P - pressão atmosférica, em bar.

4.3.3. Bocal de Fibra e PVC

Bocal feito exclusivamente para as medições deste trabalho. Serve para regularizar a vazão do biogás na saída dos drenos e tem por objetivo obter uma seção conhecida e um fluxo de gás com velocidades maiores e uniformes. Abaixo, na Figura 6 pode-se conferir o perfil do bocal.

Figura 8 - Bocal de Fibra e PVC



Fonte: Acervo próprio.

Para a confecção do bocal, primeiramente foi feito um molde de acordo com dimensões pré-estabelecidas. Após esta etapa o molde passou por um tratamento com desmoldante e posterior laminação com manta de fibra de vidro, resina epóxi e PVC. O tempo de secagem foi de 24 horas, e em seguida, a peça foi desmoldada e fixada em um tubo de PVC (poli cloreto de vinila) possuindo 200 mm de diâmetro. Na parte superior do tubo foi fixado um tubo de PVC com 80 mm de diâmetro. Este tubo possui em sua lateral um furo de 12 milímetros, onde se insere

o medidor do termo anemômetro e a mangueira do analisador de gases (GEM 5000).

4.3.4. Campânula Metálica

A campânula é uma estrutura metálica e tem por objetivo isolar o dreno e direcionar o biogás a ser medido para uma única saída de seção conhecida. A regularização do bocal nos drenos proporciona assim um diâmetro adequado e possível de se realizar as medições em qualquer dreno que for necessário. Na parte superior da campânula é acoplado o bocal de fibra e PVC. A campânula possui diâmetro superior de 0,2m e inferior de 1,5 m. Sua altura é de 1,9 m (Figura 7).

Figura 9 - Campânula Metálica



Fonte: Acervo próprio.

Nos dias de realização das medições a empresa responsável pela gestão do aterro cede uma retroescavadeira para apoio na atividade. Esta máquina é necessária para carregar a campânula metálica, devido suas

dimensões e peso. Esta campânula tem seu papel primordial nas medições devido ao fato de os drenos serem feitos de pedra, o que impediria o encaixe do bocal de fibra diretamente neles. Assim, a campânula é encaixada na superfície do dreno e a borda enterrada a cerca de 10 cm, isolando-o totalmente. Um exemplo dos drenos pode ser observado na Figura 8.

Figura 10 - Exemplo Dreno Biogás



Fonte: Acervo próprio.

4.3.5. Procedimentos de Caracterização em Campo

As análises foram realizadas de forma quinzenal, e na véspera do dia da realização das análises os drenos foram apagados pela empresa responsável pela gestão do aterro. .

As análises foram executadas da seguinte maneira: após a equipe chegar ao aterro, era solicitado uma retro escavadeira e um funcionário de apoio para conduzi-la. Assim, a retroescavadeira levava a campânula até os drenos a serem medidos. A campânula era colocada sob o dreno, e sob a campânula colocava-se o bocal de fibra de vidro e PVC. Em todos os drenos era necessário aguardar cerca de 20 minutos para o início da

realização das medições, com o intuito de promover a homogeneização do gás no interior da campânula e promover a regularização da vazão na saída do tubo de PVC.

Após aguardar 20 minutos, iniciavam-se as medições, o tubo deste analisador de gases (GEM 5000) é colocado na parte superior do tubo de PVC e o sensor do termo anemômetro no orifício na parte lateral. Aguardava-se o tempo requerido pelo analisador de gases (cerca de 120 segundos) e anotam-se os resultados.

O procedimento de medição dos parâmetros e vazão do biogás podem ser observados da Figura 11 à Figura 14.

Figura 11 - Colocação Campânula Metálica no Dreno de Biogás



Fonte: Acervo próprio.

Figura 12 - Acoplamento Bocal de Fibra e PVC



Fonte: Acervo próprio.

Figura 13 - Certificação Anti-Vazamentos



Fonte: Acervo próprio.

Figura 14 - Análise e Medição de Biogás



Fonte: Acervo próprio.

4.4. Ensaio BMP

O ensaio BMP (*Biological Methane Potential*) visa avaliar, em laboratório, o potencial de geração de metano (L_0) de resíduos recém-chegados ao aterro sanitário. Consiste na utilização de uma pequena fração de resíduos sólidos, previamente cortada e triturada, colocada em um frasco de vidro e inoculada com uma fração de lodo de digestor anaeróbio de estações de tratamento de esgoto (ETE). Dessa forma, é promovida a aceleração da degradação da amostra de resíduo coletada e mantida a viabilidade das bactérias metanogênicas, através de condição anaeróbia restrita, obtida por meio da recirculação de uma mistura gasosa (CO_2/N_2) no recipiente (ALVES, 2008; HANSEN et al., 2004).

Para a realização deste ensaio foi recolhida uma pequena amostra dos resíduos (Figura 15) do aterro sanitário que foi estudo de caso deste trabalho, em específico, os resíduos da frente de trabalho. Posteriormente, a amostra foi separada de forma manual, encaminhada ao LIMA/UFSC e submetida à pesagem e secagem em estufa para realização do ensaio de umidade e sólidos voláteis. Após essa análise os resíduos foram colocados nos digestores e dispostos em ambiente térmico com temperatura de 35°C. Subsequente a esta etapa, foi executada a análise e medição da geração de metano (L_0) por 15 dias.

Figura 15 - Amostra de Resíduos



Fonte: Acervo próprio.

Neste ensaio utilizou-se como inóculo o lodo proveniente da estação de tratamento de esgoto da Lagoa da Conceição, localizado no município de Florianópolis – SC, administrada pela CASAN (Companhia de Águas e Saneamento). Este lodo, após realização de análise de STV, apresentou um teor de 4,5%.

Para realização do ensaio BMP algumas etapas foram executadas e serão apresentadas no item a seguir.

4.4.1. Etapas do Ensaio BMP

A primeira etapa executada no ensaio, como dito anteriormente consistiu na quantificação do teor de umidade dos resíduos e do teor de STV do lodo (Inóculo). Foi realizado em estufa e seu valor foi obtido pela diferença dos pesos entre amostra úmida e seca.

Primeiramente, as amostras de resíduo e lodo foram colocadas em cadinhos. Posteriormente foram pesadas para obter a massa total (Mt). Com este valor encontrado os cadinhos foram inseridos na estufa e mantidos a temperatura de 105°C por 24 horas. Após esse tempo, as amostras começaram a ser medidas em intervalos de 30 minutos até obter um valor constante, representando o (Ms), massa seca. Por fim o teor de umidade do resíduo é determinado pela diferença entre os valores de Massa total e massa úmida.

A segunda etapa do ensaio consistiu na análise e quantificação dos Sólidos Voláteis (STV). Este ensaio foi realizado para obter o teor de sólidos voláteis para a massa de resíduos e do lodo. O valor final é obtido por meio da diferença entre o valor encontrado de resíduo total pelo valor de resíduo fixo.

O ensaio inicia-se inserindo uma amostra dos resíduos e lodo nos cadinhos, ou são levados a mufla com uma temperatura de 550°C, por 30 minutos. Depois de ocorrido este tempo, os cadinhos são transferidos para estufa e resfriados parcialmente por 30 minutos. Por fim, levaram-se os cadinhos ao dissecador para que eles atingissem temperatura ambiente. Quando a temperatura desejada foi alcançada, os cadinhos foram pesados para obter o peso final. Com isso obteve-se o valor de sólidos voláteis pela diferença de peso entre a amostra antes da realização do ensaio e depois.

4.4.2. AMPTS II

Para a realização do ensaio de medição de metano foi utilizado o equipamento AMPTS II. Este equipamento pertence ao LIMA/UFSC (Laboratório Integrado de Meio Ambiente) e é utilizado em outros projetos além deste. É composto por três unidades, sendo unidade com reatores mantidos em banho Maria, unidade fixadora de CO_2 e unidade de medição de biogás.

A primeira unidade (Figura 16) a ser montada do equipamento foi a unidade fixadora de CO_2 , em que se utilizou uma solução de NaOH para fixar o CO_2 . Assim 80 ml de mistura NaOH foram adicionados em cada frasco que a unidade possui. Em seguida, cada frasco foi fechado com uma tampa contendo dois tubos, e em cima desta foi colocada mais uma tampa de plástico em cada frasco.

Figura 16 - Unidade Fixadora de CO_2 (AMPTS II)



Fonte: Acervo próprio.

A segunda unidade (Figura 17) montada foi a com os frascos em banho Maria. Primeiramente, os dados de sólidos voláteis e umidade obtidos nos ensaios anteriores foram inseridos no software do equipamento. Assim a proporção de sólidos voláteis e inóculos, e para

tantas utilizaram-se duas relações, sendo 1:1 e 1:2. A partir daí, o próprio software dispõe os valores de inoculo e substrato a serem colocados em cada frasco.

Figura 17 - Unidade Frascos Banho Maria (AMPTS II)



Fonte: Acervo próprio.

Neste caso os valores de dosagem gerados pelo software podem ser conferidos na Tabela 2:

Tabela 2 - Valores Dosagem BMP

Relação	Resíduo (Substrato) (g)	Lodo (Inoculo) (ml)
1:1	64,5	168
1:2	111,08	144,5

Fonte: Elaboração própria.

Após a realização das dosagens determinadas os frascos foram devidamente fechados com tampa de borracha com os dois tubos de metal e a haste de agitação na abertura de cada garrafa. Posicionou-se o suporte do motor e encaixou-se até que a rosca não fosse mais visível.

A última unidade (Figura 18) a ser montada foi a de medição de metano. Esta unidade foi primeiramente preenchida com água destilada, dentro dos limites pré-estabelecidos pelo fabricante. Em seguida, foi aplicado um fluxo de N_2 nas amostras por 2 minutos, no intuito de garantir um meio anaeróbio nos reatores.

Figura 18 - Unidade Medição de Metano (AMPTS II)



Fonte: Acervo próprio.

Por fim, após a realização da montagem de todas as três etapas (Figura 19), o experimento iniciou-se com banho Maria a 35° C. O próprio software do programa começa a registrar e gerar gráficos conforme as medições vão sendo realizadas.

Figura 19 - AMPTS II



Fonte: Acervo próprio.

Este ensaio foi realizado por 15 dias, considerando que o período de produção de biogás começa a ser intensificado a partir do décimo dia da incubação (ALVES, 2008). Durante todo o ensaio o equipamento foi devidamente verificado e vistoriado, no intuito de garantir o bom desempenho do ensaio e evitar interferências ou problemas no sistema.

4.4.3. Comparação Ensaio Sólidos Voláteis Antes e Depois BMP

As amostras que foram utilizadas no ensaio BMP após sua mistura foram analisadas novamente nos parâmetros de umidade e sólidos voláteis. Como utilizou-se água destilada para dissolução da composição, mediu-se também o pH. Essa análise foi realizada antes e depois da realização do ensaio BMP, para posteriormente comprovar ou não se as amostras foram acidificadas.

4.5. Comparação de Estimativas de Geração

Ao fim das etapas de análise de campo e ensaio BMP foram realizadas estimativas de geração do biogás. O software utilizado para avaliação do potencial de geração do biogás chama-se LandGEM (*Landfill Gas Emissions Model*), versão 3.02. Segundo ESMAP (2004),

este modelo é o mais adequado para a finalidade pretendida e é o modelo mais utilizado e aceito pela agência americana e comunidade científica. Ele possui interface de aplicação simples e foi desenvolvido pela *United States Environmental Protection Agency* (USEPA, 2002).

O modelo em questão é fundamentado em uma equação empírica (equação 3) de decaimento, de primeira ordem, baseando-se na suposição de que há uma fração constante de material biodegradável no aterro por unidade de tempo. Na equação de decaimento a constante de velocidade de geração de metano (k) representa a taxa de biodegradação de primeira ordem em que o metano é gerado após a colocação de resíduos.

$$Q_{(CH_4)i} = kl_0m_i e^{-kti} \quad (3)$$

Os valores típicos de k variam de 0,02 para locais secos a 0,07 para locais molhados (USEPA, 1994).

- Ano de abertura e fechamento do aterro – Fornecidos pela empresa responsável pela gestão do aterro;
- Constante (k): utilizou-se o valor indicado pela (USEPA, 2002), tratando-se de aterros com precipitações anuais mais de 500 mm até 1000 mm;
- Fator de decaimento (L_0): O valor utilizado foi obtido a partir do ensaio de atividade metanogênica (BMP).

5. Resultados e Discussões

5.1. Caracterização da Emissão do Biogás Gerado no Aterro

Foram realizadas no total 79 amostragens para medição do biogás no aterro sanitário de Brusque, de acordo com toda a metodologia apresentada no item 4. No início, havia-se planejado sempre medir a vazão e concentração de CH_4 de 7 drenos do aterro sanitário. Entretanto, devido à vazão e concentração de CH_4 se apresentarem insuficientes, os drenos numerados como 2, 3, 4, 6 e 7 foram sendo descartados ao longo do monitoramento. Por fim, os drenos que apresentaram valores consistentes para medição e caracterização do biogás foram os drenos 1 e 5.

A Tabela 3 apresenta os valores de concentração dos gases que formam o biogás e gases traços e temperatura de acordo com as datas e horários das medições realizadas nos drenos 1 e 5 no período de análise.

Tabela 3 - Concentração Biogás

Data	Dreno	CH₄ (%)	CO₂ (%)	O₂ (%)	H₂S (ppm)	CO (ppm)	T (°C)
12/12/2014	1	53,4	36,6	2,4	71,0	8,0	67,0
	5	54,2	37,6	2,5	34,0	6,0	39,7
	1	28,1	19,8	10,5	50,0	3,0	41,2
23/01/2015	1	24,1	16,5	13,3	0,0	2,0	33,5
	1	24,4	16,8	12,1	0,0	2,0	34,6
	1	40,3	28,9	7,3	1,0	3,0	34,1
	1	52,5	37,3	2,9	4,0	3,0	35,0
	1	52,3	37,0	3,2	8,0	4,0	37,5
05/02/2015	1	45,8	31,7	4,8	1,0	3,0	32,8
	1	58,4	40,1	1,5	5,0	4,0	33,8
05/03/2015	5	57,0	42,9	0,1	114,0	7,0	30,9
	1	48,0	33,3	4,3	27,0	5,0	43,3
	1	51,4	34,7	3,6	45,0	5,0	43,1
19/03/2015	5	53,2	37,3	3,0	1,0	4,0	36,0
	5	57,9	40,8	1,2	1,0	4,0	36,2
	1	47,1	33,4	3,9	1,0	3,0	35,2
24/04/2015	5	57,8	41,4	0,8	88,0	6,0	65,7
	1	44,8	30,7	5,6	18,0	4,0	70,4
	1	48,9	33,5	4,2	22,0	4,0	68,4
30/04/2015	5	51,5	35,9	3,9	1,0	3,0	33,0
	5	56,0	38,6	2,5	1,0	4,0	32,5
	5	57,9	40,6	1,5	1,0	3,0	32,0
	1	37,8	26,7	8,0	0,0	2,0	28,9
	1	39,8	28,1	7,3	1,0	2,0	28,9
	1	41,8	29,4	6,7	1,0	2,0	28,2
	1	42,2	29,7	6,6	1,0	2,0	28,7
14/05/2015	1	43,0	30,2	6,3	1,0	2,0	28,0
	1	34,7	24,2	9,6	0,0	2,0	26,5
	1	39,5	27,8	7,8	0,0	2,0	27,0
	1	42,0	29,5	6,8	0,0	2,0	27,0
	1	47,4	33,0	5,0	0,0	3,0	27,9
	1	48,7	33,8	4,6	1,0	2,0	27,8
	1	48,8	39,8	4,6	1,0	3,0	27,9
	5	36,5	26,3	8,6	1,0	2,0	29,6

Data	Dreno	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	H ₂ S (ppm)	CO (ppm)	T (°C)
	5	42,7	30,6	6,5	1,0	3,0	29,1
	5	47,0	33,4	5,2	1,0	3,0	29,5
	5	50,6	35,7	4,1	1,0	3,0	28,0
	5	51,2	36,0	4,0	1,0	3,0	26,1
	5	52,0	36,4	3,7	2,0	3,0	24,1
	5	51,6	36,2	3,9	2,0	3,0	21,4
15/05/2015	5	54,9	37,9	2,9	1,0	3,0	34,0
	1	42,0	29,6	6,7	0,0	1,0	35,0
21/05/2015	5	57,6	42,9	4,1	1,0	2,0	29,2
	5	52,3	43,1	3,4	1,0	3,0	28,7
	5	56,3	44,2	3,9	1,0	2,0	28,8
	1	47,2	33,2	3,9	1,0	1,0	29,7
	1	45,1	36,1	3,8	1,0	2,0	28,1
	1	45,9	35,6	3,8	1,0	2,0	27,6
25/06/2015	1	52,3	38,2	2,6	8,0	2,0	19,1
	1	53,4	34,9	4,3	1,0	3,0	27,5
	5	52,7	35,5	4,2	1,0	3,0	27,5
Média		47,5	33,8	4,9	10,3	3,1	33,8
Desvio Padrão		8,2	6,2	2,7	23,6	1,4	11,1
Mínimo		24,1	16,5	0,1	0,0	1,0	19,1
Máximo		58,4	44,2	13,3	114,0	8,0	70,4

Fonte: Elaboração própria.

Durante o período em que foram realizadas as medições, o dia em que se obteve a maior concentração de biogás conforme a tabela 3 foi dia 05/02/2015 e o dia de menor concentração foi 23/01/2015. Mesmo com essa variação nos valores apresentados, de acordo com as bibliografias pesquisadas os valores médios de concentração de CH₄ das amostragens realizadas nos drenos 1 e 5 estão dentro do intervalo típico (Alcantara, 2007; Dias, 2009, Regattieri, 2009), o que corresponde a 47,5%.

Os valores de H₂S apresentaram-se com valor acentuado em sua média. Este fato pode ser explicado devido aos valores altos de concentração medidos nos dias 12/12/2014, 05/03/2015 e 24/04/2015. Segundo Souza (2009), a solubilidade em água do gás H₂S é de 1 grama

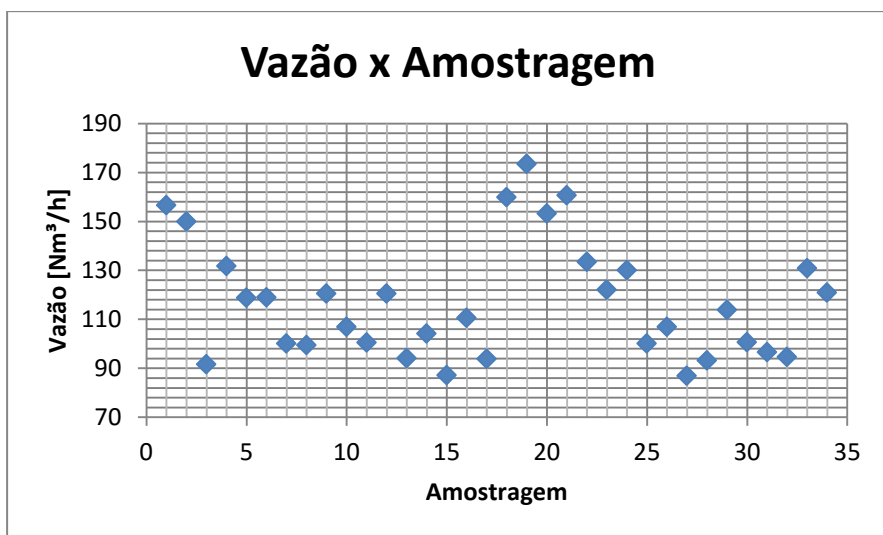
a em 242 ml a 20°C, sendo assim a diferença dos valores se dá devido ao fato de os drenos terem sido apagados poucos minutos antes de se iniciar as medições.

Segundo Eller (2013) e Zanette (2009), os valores de O₂, CO₂ e CO estiveram dentro das concentrações tipicamente encontradas em gases de aterros.

A temperatura do biogás se apresentou com valor médio de 33,8°C. As bactérias da digestão anaeróbia possuem três faixas de temperatura associadas ao seu crescimento (Lima, 1998; Brito, 2005), sendo: Faixa Psicofílica – 0 a 20°C; mesofílica – 20 a 45°C e termofílica – 45 a 70°C. Sendo assim, a atividade presente em questão está dentro da faixa mesofílica.

A metodologia de medição do biogás utilizada resultou na vazão como apresentado na Figura 20.

Figura 20 - Gráfico de Vazão do Biogás do Aterro de Brusque



Fonte: Elaboração própria.

A metodologia de medição de vazão não foi iniciada em conjunto com a de concentração devido a diferentes problemas operacionais, como por exemplo, problemas de calibração e resultados

insatisfatórios gerados pelo aparelho GEM 5000 e dificuldades técnicas e operacionais do aparelho termo anemômetro.

Como pode ser observado no gráfico apresentado, os valores tenderam a se apresentar em um quadro com características constantes. A média das vazões apresentadas foi de 112,13 Nm³/h. Se for utilizado valor encontrado da média do CH₄, de 47,5%, encontra-se uma vazão específica de 53,26 Nm³CH₄/h.

Através deste resultado obtido e comparando com a vazão específica requerida pelo moto gerador, de 11,4 Nm³CH₄/h, concluiu-se que neste aterro sanitário há cerca de 5 vezes mais produção de biogás do que o necessário.

As medições dos drenos foram realizadas por cerca de 6 meses. Durante todo esse período as concentrações de metano se apresentaram regulares nos drenos determinados como referência. Observando os valores apresentados na tabela 3 pode-se observar que ambos os drenos, 1 e 5, apresentaram semelhantes quadros de variação de concentração de CH₄, variando de 24,1 a 57,9%.

5.2. Ensaio BMP

O ensaio de atividade metanogênica foi executado em dois momentos. O primeiro ensaio foi realizado por Silvestre (2015), utilizando como fonte de resíduo o mesmo aterro e a mesma metodologia apresentada no item 4.3. Neste primeiro ensaio, foi utilizado resíduo recém coletado do aterro e resultou em um L₀ (Potencial de geração de metano) válido para ser inserido no software LandGEM.

O segundo ensaio utilizou o mesmo resíduo coletado por Silvestre (2015), o qual foi mantido em congelamento para não perder suas propriedades físico-químicas e evitar a degradação durante o tempo. No entanto, após o processo de descongelamento e realização do ensaio, foi observada uma possível alteração das propriedades dos resíduos. Especula-se que parte das substâncias orgânicas solúveis possam ter sido perdidas durante o descongelamento, acabando por ficar

boa parte de resíduos inorgânicos como plásticos, vidros, etc. Os resultados e discussão deste ensaio são detalhados no item a seguir.

5.2.1. Ensaio BMP com Resíduo Pós Congelamento

Este ensaio foi realizado três meses após a coleta dos resíduos no aterro sanitário. Os resíduos passaram por processo de descongelamento simples, assim, foram retirados do freezer e deixados atingir temperatura ambiente por 24 horas. Durante este processo, já foi constatada a perda de água e possivelmente de outras substâncias, como compostos orgânicos ali presentes, pois a coloração da água resultante do descongelamento estava mais escura.

5.2.1.1. Teor de Umidade

A partir da análise de umidade realizada constatou-se que o resíduo possuía inicialmente uma umidade média de 72,61% (Tabela 4). Este valor foi obtido a partir de três medições realizadas em três amostras do mesmo resíduo. Por fim fez-se a média das triplicatas. Este valor ficou pouco acima dos valores encontrados por Firmo (2013), de 70% e Alcântara (2007), de 52%. E abaixo do encontrado por Crovador (2014), de 76%.

Tabela 4 - Resultados Teor de Umidade

Número Cadinho	Composto	Peso Cadinho (g)	Peso Úmido (g)	Peso Seco Estufa (g)	Teor de Umidade (%)
1	Resíduo	49,34	21,4	5,61	73,79
2		43,8	17,34	5,35	69,15
3		51,55	19,47	4,89	74,88
4	Lodo	47,3	40,08	2,68	93,31
5		47,7	38,17	2,6	93,19
6		51,02	36,51	2,48	93,21

Fonte: Elaboração própria.

Segundo Castilhos et al, (2003), o teor de umidade pode variar de acordo com diferentes características contidas no aterro sanitário em que

se encontra o resíduo, como umidade do solo e do ar, assim como características do próprio resíduo, como fracionamento e composição gravimétrica.

Os ensaios foram realizados também para o lodo, no intuito de comparação dos valores obtidos da média da umidade proporcionada pelos cadinhos contendo apenas lodo, com os cadinhos contendo resíduo. O valor encontrado está dentro do esperado para o lodo, comprovando seu alto teor de umidade devido à quantidade de água presente em seu meio.

5.2.1.2. Teor de Sólidos Voláteis

O teor de sólidos totais voláteis obtido para o resíduo após realizar a média das triplicatas foi de 23,20% (Tabela 5). Este valor representa a quantidade de material (em peso) do resíduo que pode ser degradado biologicamente.

Tabela 5 - Resultados Teor Sólidos Voláteis

Amostra		Peso Cadinho (g)	Peso Úmido (g)	Peso Seco Estufa (g)	Peso pós Mufla (g)	Sólidos Totais (%)	Sólidos Totais Voláteis (%)
Resíduo	1	49,340	21,400	5,610	0,264	26,2	25,0
	2	43,800	17,340	5,350	1,297	30,9	23,4
	3	51,550	19,470	4,890	0,754	25,1	21,2
Lodo	4	47,300	40,080	2,680	0,904	6,7	4,4
	5	47,700	38,170	2,600	0,880	6,8	4,5
	6	51,020	36,510	2,480	0,856	6,8	4,4

Fonte: Elaboração própria.

O valor encontrado para o teor de SV ficou bem abaixo do encontrado por Santos et al. (2010), de 55,76%. Segundo Alcântara (2007), resíduos recém chegados ao aterro sanitário costumam apresentar teores de 70% de SV. Já resíduos com mais de um ano no aterro apresentam teores de 35% de sólidos voláteis, devido aos processos de degradação.

A média obtida neste estudo pode ser explicada pelo tempo de transição em que houve a coleta do resíduo no aterro e o tempo em que foi realizado este experimento, no caso, 60 dias.

O teor de sólidos voláteis apresentado pelos cadinhos contendo apenas lodo apresentou-se bem abaixo dos valores encontrados para os resíduos, o que os tornaria um bom inóculo a ser utilizado no ensaio BMP, já que teoricamente não iria interferir na geração de metano proporcionada pelos resíduos.

5.2.1.3. Geração de Metano (L_0)

Como já informado anteriormente, a geração de metano no ensaio BMP tem sua maior taxa de produção nos primeiros 10 dias (Alves, 2008; Crovador, 2014). A partir desse período a geração começa a se estabilizar. O ensaio BMP realizado para este trabalho foi executado em 15 dias e utilizaram-se as relações 1:1 e 1:2 para a quantidade de resíduos x inóculo a serem colocados em cada frasco.

O comportamento do ensaio pode ser observado abaixo nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 6 - Geração de CH₄ para Relação 1:1

Dia	Relação 1:1 A [Nml/dia]	Relação 1:1 C [Nml/dia]	Relação 1:1 D [Nml/dia]
1	61,5	59,8	51,6
2	57,5	44,1	70,8
3	23,5	30,3	18,9
4	25,7	29,7	17,0
5	8,9	16,3	12,3
6	9,9	13,8	7,3
7	11,2	16,0	9,6
8	6,9	12,3	9,9
9	5,5	15,1	9,0
10	5,7	10,6	10,0
11	7,2	7,8	
12	7,2	7,2	
13			
14			
15			
Total de Produção CH₄	230,7 Nml	263,0 Nml	216,4 Nml

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 7 - Tabela 6- Geração de CH₄ para Relação 2:1

Dia	Relação 1:2 A [Nml/dia]	Relação 1:2 B [Nml/dia]	Relação 1:2 C [Nml/dia]
1	58,7	47	55,3
2	92,6	110,2	97,9
3	16,9	18,2	21,6
4	14,0	10,1	14,8
5	16,0	12,6	12,5
6	12,4	12,5	6,7
7	13,7	9,9	10,0
8	8,0	3,0	8,8
9	2,7	3,0	
10	2,7	3,0	
11	2,7		
12	2,7		
13			
14			
15			
Total de Produção CH ₄	243,1 Nml	229,5 Nml	227,6 Nml

Fonte: Elaboração própria.

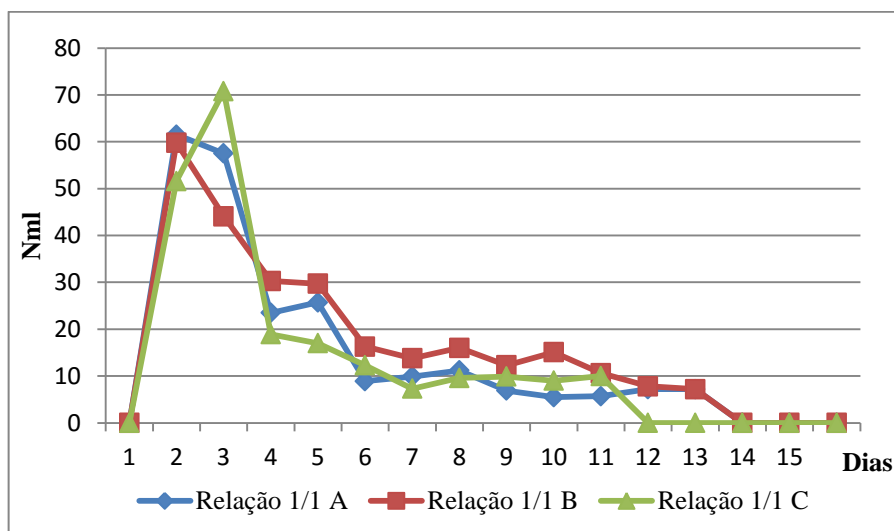
Como pode ser observado, o pico de produção foi constatado no primeiro e segundo dia de medição. Segundo Crovador (2014) e Firmo (2013) o pico de geração de biogás logo no primeiro dia pode ser explicado pela ausência de oxigênio desde o início do experimento, pois a circulação de nitrogênio gasoso nos biodigestores garante a anaerobiose do sistema, otimizando a produção do biogás. Outro fator que contribui com do pico de geração de biogás são as substâncias facilmente biodegradáveis presentes no substrato e ao inoculo rico em microorganismos ativos utilizado (Parawiraet al., 2004).

O experimento deste trabalho foi realizado em 15 dias, e em seu último dia todas as amostras contendo resíduo e inoculo já haviam parado de gerar metano. Segundo Von Sperling (1996), quanto maior a

concentração de DBO remanescente no meio, mais rapidamente se processa a taxa de estabilização (biodegradação). Após algum tempo de experimento a taxa de geração de metano se encontra reduzida, devido à menor concentração de matéria orgânica do meio. Com isso, o pico de geração de biogás pode ser explicado nos primeiros dias de experimento, já que no início a quantidade de matéria orgânica era maior. Por consequência, como a quantidade de matéria orgânica vai diminuindo, o ritmo de conversão de matéria orgânica em biogás se reduz, estabilizando e zerando ao fim.

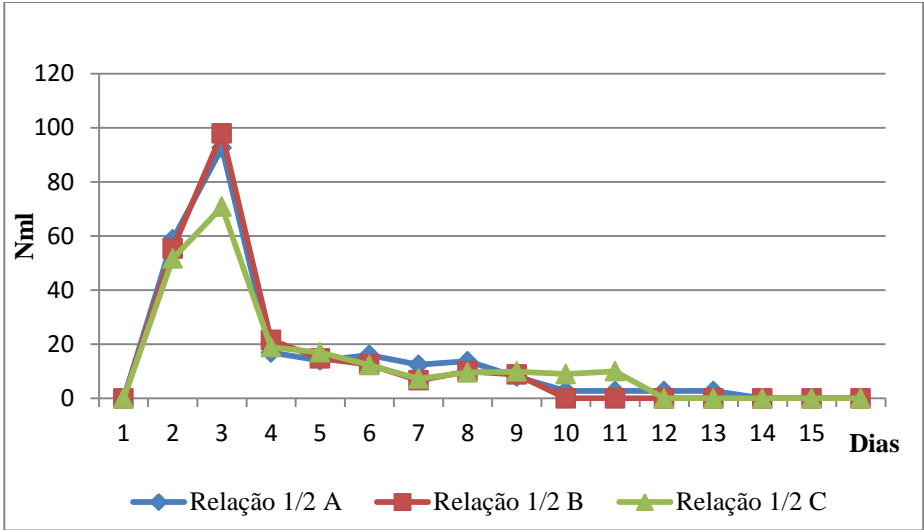
O comportamento de geração de metano pode ser visualizado de forma gráfica conforme a Figura 17 e 18, evidenciando sua estabilização.

Figura 21 - Geração CH₄ Relação 1:1



Fonte: Elaboração própria.

Figura 22 - Geração CH4 Relação 1:2



Fonte: Elaboração própria.

Outro fator que pode ter contribuído com a diminuição da geração de biogás é a acidificação do meio. De acordo com as Tabelas 8 e 9 pode-se comparar o pH das amostras antes e depois da realização do ensaio.

Tabela 8 - Análise do pH antes do Experimento BMP

Relação	Teor de umidade (%)	pH	Média STV
1	95,82	5,31	2,56
1	92,58	5,58	
0,5	89,7	5,11	1,79
0,5	94,85	5,84	

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 9 - Análise do pH após Experimento BMP

Relação	Teor de umidade (%)	pH	Média STV
1	97,22	4,84	2,43
1	96,58	4,9	
0,5	97,82	5	2,12
0,5	97,07	4,87	

Fonte: Elaboração própria.

De acordo com os dados expostos nas tabelas acima, pode-se constatar que as amostras foram acidificadas. Segundo Melo (2010), a acidificação do meio pode ser proporcionada pela dissolução/solubilização do dióxido de carbono gerado na degradação dos resíduos.

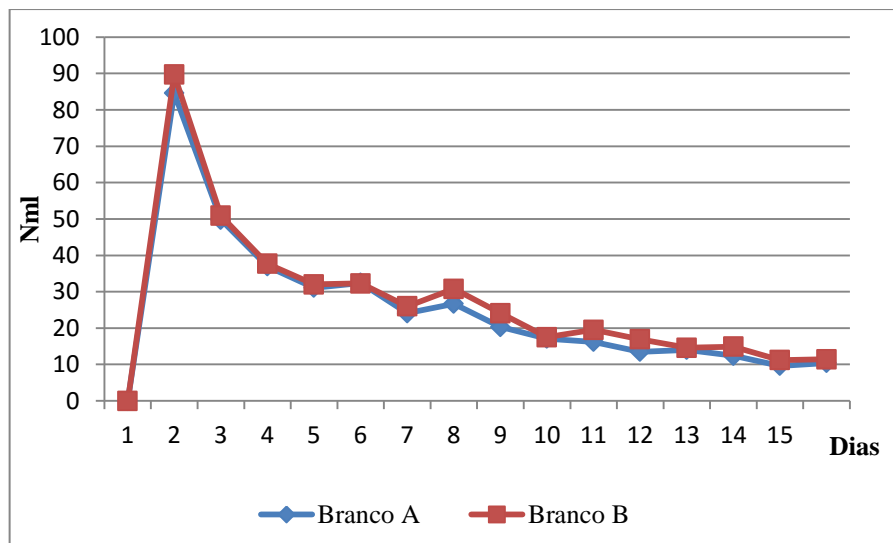
Neste experimento também foram utilizados dois frascos contendo apenas o inóculo (Tabela 10). As amostras foram nomeadas como “branco” e foram necessárias para poder realizar o cálculo de desconto da geração de metano propiciada pelo inóculo do substrato.

Tabela 10 - Geração CH₄ Inóculo

Dia	Branco A [Nml/dia]	Branco B [Nml/dia]
1	84,6	89,7
2	49,8	50,9
3	37	37,7
4	31,1	32
5	32,4	32,3
6	24,1	26
7	26,7	30,8
8	20,3	24,1
9	17,1	17,5
10	16,2	19,5
11	13,5	16,9
12	14	14,6
13	12,4	14,9
14	9,6	11,2
15	10,4	11,4
Média de Produção de CH ₄	20,3 Nml	24,1 Nml

Fonte: Elaboração própria.

Figura 23 - Geração CH₄ Pelas Amostras "branco"



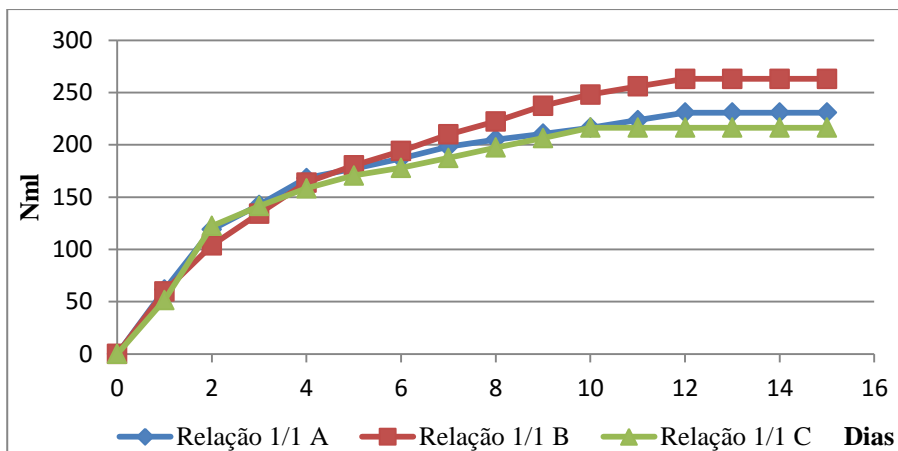
Fonte: Elaboração própria.

As amostras de nominadas “branco” A e B (Figura 23) tiveram comportamentos de geração de metano semelhantes às amostras apresentadas anteriormente. No entanto elas continuaram gerando metano até o fim desta experiência.

5.2.1.4. Cálculo do Potencial de Geração de Metano (L_0)

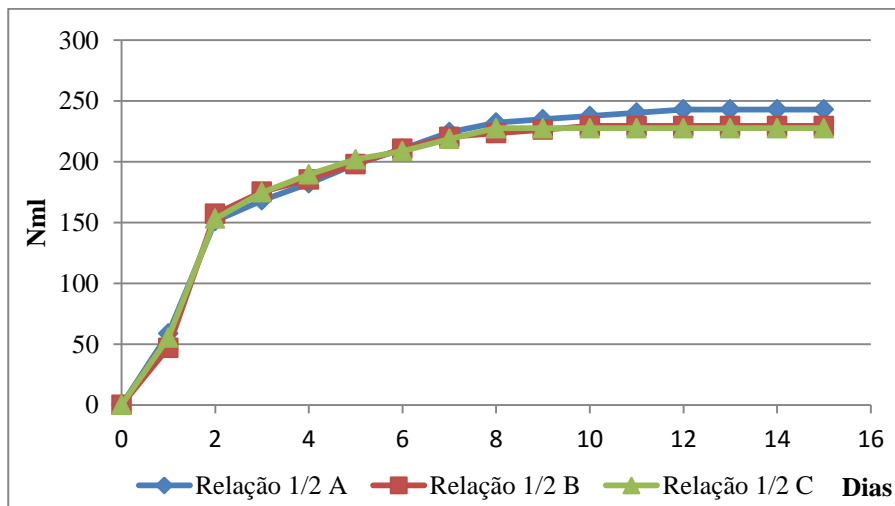
Para realizar o cálculo do potencial de geração de metano (L_0) utilizou-se o volume de metano acumulado dos experimentos.

Figura 24 - Volume de CH₄ Acumulado para a Relação 1:1



Fonte: Elaboração própria.

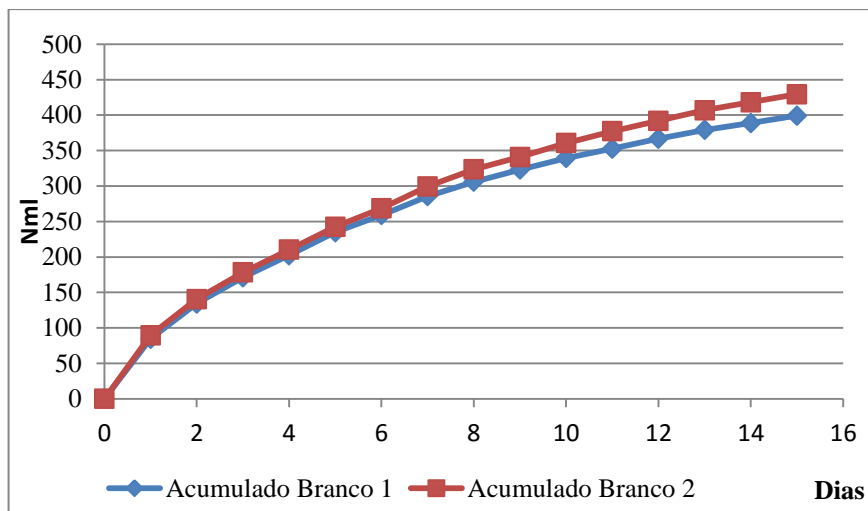
Figura 25 - Volume de CH₄ Acumulado para a Relação 1:2



Fonte: Elaboração própria.

Os volumes de metano acumulados evidenciados nas Figura 24 e Figura 25 se mostraram semelhantes aos resultados obtidos por Crovador, (2014) e Firmo (2013).

Figura 26 - Volume de CH₄ Acumulado Gerado por Amostras Branco



Fonte: Elaboração própria.

A geração de metano pelas amostras “branco” (Figura 26) foi muito superior à geração de metano das amostras com relação 1:1 e 1:2. Este fator está relacionado com o exposto no item 5.2, que seria a perda das propriedades dos resíduos orgânicos, o que diminui o potencial de geração de metano, já que maior parte do substrato presente nos fracos das relações 1:1 e 1:2 são inorgânicos, além do fato de se utilizar água destilada para diluição nos ensaios das relações. Foi necessário o preenchimento com água destilada para completar o volume requerido pelo aparelho e para as hélices do aparelho conseguirem funcionar com eficiência.

A metodologia para obtenção do L_0 consiste em obter a média dos valores diários da geração de metano pelas relações 1:1 e 1:2. A partir dessa média deve-se retirar a média de geração de metano

acumulada gerada pelas amostras branco 1 e 2 (Crovador, 2014; Alves, 2008).

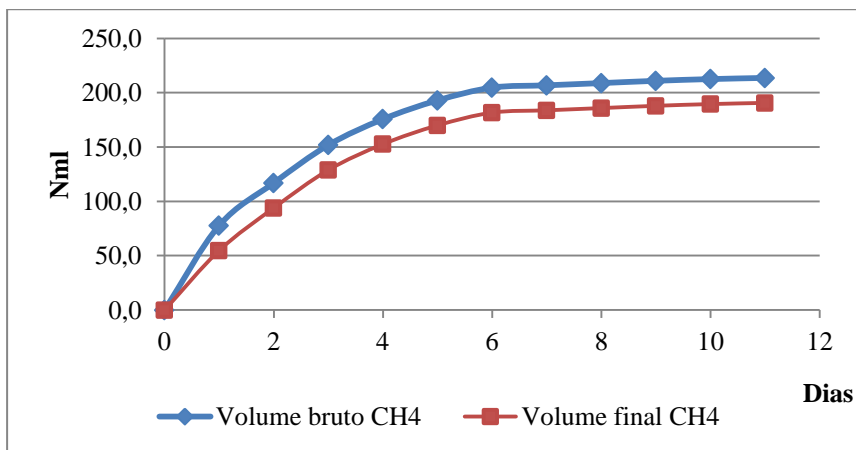
No entanto não foi possível encontrar o L_0 para este ensaio devido ao fato da média acumulada de geração de metano proporcionado pelo branco (414,35 Nml) ser muito superior a média encontrada pelas amostras 1:1 (236,7 Nml) e 1:2 (233,4 Nml). A subtração resultaria em um valor negativo, portanto este ensaio torna-se inválido.

5.2.2. Ensaio BMP com Resíduo Fresco

Para dar prosseguimento a este trabalho optou-se por utilizar um valor válido de L_0 . O valor encontrado por Silvestre (2015), que realizou caracterizações do biogás e medições junto ao autor deste trabalho, foi adequado, dentro do esperado e próximo a outros autores.

Seguindo a mesma metodologia apresentada no item 5.2.1. o volume acumulado de CH_4 foi de 213,6 Nml. Após o desconto da geração de metano devido ao inóculo obteve-se um volume de 190,6 Nml. Este ensaio foi realizado por 11 dias (Figura 27).

Figura 27 - Volume bruto e final de geração de CH_4 acumulado



Fonte: Elaboração própria.

Como a análise realizada neste experimento teve duração de 11 dias e as amostras ainda estavam gerando metano, o autor assumiu que o total acumulado representava 50% do valor total de CH₄ gerado, o que poderia chegar a 381,3 Nml (Chen et al., 1995). Dessa forma o valor obtido aproxima-se ao valor de 429,97 Nml encontrado por Crovador, (2014).

Para obter o valor final de L₀, foi considerado que dentro do período de incubação foi gerado 50% do volume de CH₄ (Chen et al., 1995). Assim, considerando um volume de 381,3 Nml CH₄, obtidos em 7,4 gstv, obteve-se 102,54 m³ CH₄/T_{STV}, ou 20,61 m³CH₄/T considerando a massa de resíduos úmidos. Este valor pode ser comparado aos valores obtidos por Alves (2008) e Brito (2005), sendo respectivamente 97 m³ CH₄/T_{STV} e 100 m³ CH₄/T_{STV}.

Este experimento também apresentou problemas com acidificação das amostras, mas não foi o fator ocasional para a finalização do ensaio.

Um ponto importante a ser ressaltado sobre este ensaio BMP utilizando o aparelho AMPS II é sua limitação quanto ao tratamento com resíduos sólidos. Como os seus frascos são de pouca dimensão (400 ml) ele acaba por não responder exatamente ao que acontece nos aterros sanitários já que não pode-se utilizar resíduos de grandes dimensões. Este fator já não é tão limitante aos ensaios realizados por reatores anaeróbios que utilizam resíduos orgânicos como efluentes suínos.

5.3. Estimativa Teórica de Geração de Biogás Gerado no Aterro

O método para análise de geração de biogás que será utilizado neste trabalho é o método *Scholl Canyon* como apresentado anteriormente no item 3.6.1. Este método foi aplicado por meio do software livre chamado LandGEM (*Landfill Gas Emissions Model*) em sua versão 3.02. Como dito anteriormente é um software de modelagem de grande importância e relevância quanto a reconhecimento por entidades científicas.

De acordo com os dados da empresa responsável pela gestão do aterro sanitário inseriu-se no modelo um dado inicial de 216.000 toneladas de resíduos correspondentes ao ano de 2014. A partir desse parâmetro utilizou-se a taxa de crescimento populacional da região do Vale do Itajaí, sendo 1,42% (SEBRAE, 2013), para calcular os dados e inseri-los no software, para que assim fosse possível realizar as

projeções para o período de 1997 a 2014 e para o período de 2014 até 2031. A partir da Tabela 11, pode-se observar os valores calculados e utilizados como entrada no software.

Tabela 11 - Projeção de Disposição de Resíduos a Partir da Taxa de Crescimento Populacional

Ano	Disposição de Resíduos (T/ano)
1997	160445,00
1998	163512,20
1999	166579,40
2000	169646,60
2001	172713,80
2002	175781,00
2003	178848,20
2004	181915,40
2005	184982,60
2006	188049,80
2007	191117,00
2008	194184,20
2009	197251,40
2010	200318,60
2011	203385,80
2012	206452,80
2013	209520,00
2014	216000,00
2015	219067,20
2016	222134,40
2017	225201,60
2018	228268,80
2019	231336,00
2020	234403,20
2021	237470,40
2022	240537,60
2023	243604,80
2024	246672,00
2025	249739,20
2026	252806,40
2027	255873,60
2028	258940,80
2029	262008,00
2030	265075,20
2031	268142,40

O valor de k como informado anteriormente no item 4.4. foi de $0,055 \text{ ano}^{-1}$, este valor foi determinado após observar os resultados dos ensaios de sólidos voláteis (67%) e umidade (73%)(USEPA, 2002; ESMAP, 2004) para os resíduos. O valor de L_0 utilizado no software foi o obtido no ensaio BMP, sendo $20,61 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{t}$ ou $102,54 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{t}_{\text{stv}}$ conforme item 5.2.2. Os dados de entrada podem ser observados na Tabela 12. A concentração de CH_4 utilizada foi a média encontrada nas medições realizadas no próprio aterro, conforme mostrado no item 5.1.

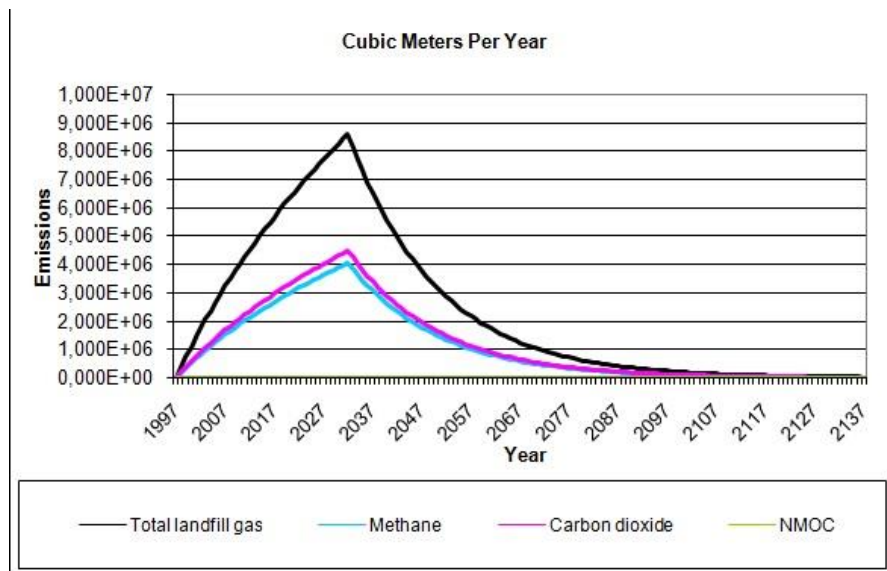
Tabela 12 - Dados de Entradado Software LandGEM

Características do Aterro	Dados de Entrada
Ano Abertura	1997
Ano Fechamento	2031
$k \text{ (ano}^{-1}\text{)}$	0,055
$\text{CH}_4(\%)$	47,5
$L_0(\text{m}^3/\text{t})$	20,61
Massa de Resíduo Depositada por Ano(T/ano)	Tabela 11

Fonte: Elaboração própria.

Após a inserção de todos os dados solicitados pelo software, ele apresentou uma curva de produção de biogás, conforme Figura 22.

Figura 28 - Resultados Geração Biogás Software LandGEM



O modelo apresentou que o aterro sanitário de Brusque poderá gerar do ano 1997 ao ano 2137 a quantia de 154.817.316,4 m³CH₄. E conforme a Figura 28, o pico de produção será no ano 2032, com a quantia de 4.083.382,9 m³CH₄. Sendo justamente um ano após o fechamento do aterro. Através destes dados pode-se obter uma confiança na produção de biogás que este aterro irá gerar por estes anos analisados. Na Tabela 13, pode-se conferir a produção de biogás e metano acumulados para os anos utilizados como referência, sendo o ano de 2014, ano de análise de dados. O ano 2031, que será o ano de fechamento do aterro. E por fim o ano de término de produção de biogás, 2137.

Tabela 13 - Resultados LandGEM

Ano	Produção Metano	Produção Biogás
2014	23.034.506,3	48.493.697,38
2031	78.737.771,4	165.763.729,3
2137	154.817.316,4	325.931.192,4

Fonte: Elaboração própria.

Os resultados obtidos por Silvestre (2015) (Tabela 14), diferem aos obtidos neste trabalho, pois em sua aplicação do LandGEM foi utilizado como dado de entrada a deposição constante de resíduos do ano 1997 ao ano 2014. O que neste trabalho foi devidamente calculado de acordo com o crescimento populacional retroativo.

Tabela 14 - Emissão de Biogás do ano 2014 a 2137

	Biogás		Metano	
	ton/ano	m ³ /ano	ton/ano	m ³ /ano
2014	19.630	1.600.124,4	4.985	7.472.581
2032	9.550	7.784.548	2.425	3.635.384
2137	303.519	247.405.199	77.081	115.538.228

Fonte: Silvestre (2015).

Observando a figura 28 e por meio de análise dos dados apresentados pelo software LandGEM, o aterro terá capacidade de gerar energia elétrica com vazão e concentração suficientes do ano 1998 ao ano 2089. Após o ano 2089 a concentração e vazão de CH₄ passam a ser que o ano de 1998 e por consequência menor do que a vazão encontrada no ano de análise em campo, 2014.

Segundo Silvestre (2015), o pico da geração de metano encontrada para o ano 2032 (3.635.384 m³CH₄) é suficiente para abastecer até 5200 residências de classe média. Utilizando os valores encontrados neste trabalho, sendo o pico de geração o ano 2032 a quantidade de 4.083.382,9 m³CH₄ seria suficiente para gerar energia para abastecer até 5840 residências.

6. Conclusões

Por meio de estudos realizados pode-se afirmar que o aproveitamento do biogás gerado no aterro sanitário de Brusque é propício à geração de energia elétrica. As medições realizadas em campo foram suficientes para comprovar que o aterro atualmente gera, somente em dois drenos considerados, uma vazão de cerca de 5 vezes o valor necessário para o moto gerador para gerar energia, sendo de 53,26 $\text{Nm}^3\text{CH}_4/\text{h}$ para 11,4 $\text{Nm}^3\text{CH}_4/\text{h}$ necessitados pelo moto gerador em questão. Com essa vazão o moto gerador tem capacidade para gerar cerca de 300 kWh.

O ensaio BMP foi apresentado em duas etapas, um obtendo resultados insatisfatórios quanto à geração de CH_4 , provavelmente devido ao uso de resíduos congelados e não frescos; outro com resíduos recém coletados do aterro. O ensaio em que foi utilizado resíduo fresco apresentou um valor de L_0 (Potencial de geração de metano) viável e passível de conversão em energia elétrica. Foi possível estabelecer uma média de geração que pode representar 50% da geração total do biogás, o que foi suficiente para ser aplicado ao software LandGEM.

Por meio do L_0 encontrado no BMP no ensaio com resíduos frescos foi modelada a geração de metano do ano de abertura do aterro até o seu ano de fechamento. Através do software pode-se obter informações de até quando o aterro iria gerar biogás, (no caso o ano 2137) e sua segurança quanto ao potencial de geração.

A modelagem por meio do software landGEM também teve sua importância no entendimento no quesito parâmetros de entrada para a posterior modelagem. Esses parâmetros devem ser bem analisados e estipulados, pois ao fim toda modelagem é afetado, podendo ser subdimensionada ou superdimensionada.

Considerando o pico de geração de metano proporcionada pelo software LandGEM, no ano 2032 o aterro irá gerar 4.083.382,9 m^3CH_4 , o que será suficiente para abastecer até 5840 residências de classe média. A segurança quanto ao abastecimento e geração de metano será entre os anos 1998 à 2089.

Portanto utilizando estes três diferentes estudos pode-se concluir com segurança que o aproveitamento energético através do biogás é possível para o aterro de Brusque

7. Referências Bibliográficas

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil** 2014. São Paulo: Grappa, 2014.

ALCÂNTARA, P. B. (2007). **Avaliação da Influência da Composição de Resíduos Sólidos Urbanos no Comportamento de Aterros Sanitários Simulados**. Tese de Doutorado. Grupo de Resíduos Sólidos (GRS), Universidade Federal de Pernambuco, Brasil.

ALVES, I. R. F. S. **Análise experimental do potencial de geração de biogás em resíduos sólidos urbanos**. 2008. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, CTG - Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

ALVES, L.C.; CAMMAROTA, M.C.; FRANÇA, F.P..**Inibição de lodo biológico anaeróbico por constituintes de efluente de laboratório de controle de poluição**. Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental, v.10, n. 3. p. 236-242, 1995.

ARMANDO, M. C. **Avaliação do Potencial do Biogás Gerado e Sistemas de Aproveitamento Energético no Aterro Sanitário do Município de Toledo - PR**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1992) NBR 8419 – **Apresentação de Projetos de Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos**.

BRITO, L, **Estudo de Gases em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos [Rio de Janeiro]**, (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, 2005) Dissertação – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 222p, 2005.

CASTILHOS JUNIOR, A. B. de et al. **Alternativas de Disposição de Resíduos Sólidos para Pequenas Comunidades: PROSAB - REDE COOPERATIVA DE PESQUISAS**. Florianópolis: Abes, 2003.

CROVADOR, M. I. C. **Potencial de geração de biogás a partir da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos**; Dissertação (mestrado) - Universidade estadual do Centro-Oeste, Programa de Pós-Graduação em Bioenergia, área de concentração em Biocombustíveis, Guarapuava, 103p, 2014.

ENERGY SECTOR MANAGEMENT ASSISTANCE PROGRAMME (ESMAP). **The world bank handbook for the preparation of landfill gas to energy projects in Latin America and the Caribbean**. Waterloo, Ontario, 2004.

ENSINAS, ADRIANO VIANA. **Estudo da geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas – SP**. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, 2003.

ELLER, C. M. **Caracterização dos Compostos Traços Influentes no Aproveitamento Energético do Biogás Gerado em reator UASB no Tratamento de Esgoto Doméstico**. 2013. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2013.

FELLENBERG, G.; **Introdução aos Problemas da Poluição Ambiental**; Editora Pedagógica e Universitária; São Paulo; 1980.

FILHO, L. F. B., **Estudo de gases em aterros de resíduos sólidos urbanos**. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2005.

FIRMO, A. L. B. et al. **Avaliação do Potencial de Geração de Biogás dos Componentes dos Resíduos Sólidos Urbanos do Aterro da Muribeca**. Recife, 2008.

FIRMO, A. L. B. **Estudo numérico e experimental da geração de biogás a partir da biodegradação de resíduos sólidos urbanos**. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 286 p, 2013.

HANSEN, T.L.; SCHMIDT, J.E.; ANGELIDAKI, I.; MARCA, E.; JANSEN, J.C.; MOSBAEK, H.; CHRISTENSEN, T.H. (2004). **Method for determination of methane potentials of solid organic waste.** *Waste Management*, v.24, p. 393 – 400.

JUCÁ, J.F.T., Mariano, M.O.H., Melo, V.L.A. & Bastos, E.G. (1998), **Monitoring of environmental recuperation of the Muribeca Municipal Solid Waste Landfill, Proceedings of The Third International Congress on Environmental Geotechnics**, Seco e Pinto (Ed), Lisbon, Vol.2, 485-489.

KOMPOGAS, **Facility**. Environmental Product Declaration. Flughofstrasse.

LIMA, A. S. de. **Análise de Desempenho de Reator Anaeróbio (UASB) Associado a Leito Cultivado de Fluxo Subsuperficial para Tratamento de Esgoto Doméstico.** Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologia Ambiental e Recursos hídricos, de Tecnologia da Universidade de Brasília, Brasília, 1998.

MALANCONI, R.; CABRAL, R. C. **Impactos e Benefícios da Produtividade de Biogás em Aterro Sanitário.** *RevInter Revista Intertox de Toxicologia, Risco Ambiental e Sociedade*, v. 5, n. 2, p. 135-158, jun. 2012.

MERBACH JR., P. S.. **Estudos de avaliação de metais pesados em percolado de aterro sanitário em função do tempo de disposição.** Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1989.

MMA, Ministério do Meio Ambiente. **Estudo sobre o Potencial de Geração de Energia a partir de Resíduos de Saneamento (lixo, esgoto), visando incrementar o uso de biogás como fonte alternativa de energia renovável,** São Paulo, 2010.

MONTEIRO, J. H. P. **Manual de Gerenciamento Integrado de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro: Ibam, 2001.

PACHECO, F. **Energias Renováveis: breves conceitos.** Conjuntura e Planejamento, Salvador: p.4-11, out. 2006.

PALMISANO, A.C. e Barlaz, M.A. (1996), **Microbiology of solid waste**, CRC Press, Inc., Boca Raton, Flórida, USA.

POHLAND, F.G; GOULD, J.P. (1986). **Fate of Heavy Metal During Landfill Stabilization of Solid Wastes Material with Leachate Recycle.** *Draft Final Report.* USA.

QIAN, X.; KOERNER, R. M.; GRAY, D. H. **Geotechnical aspects of landfill design and construction.** New Jersey: Prentice Hall, 717p, 2002.

REICHERT, G. A. **A Vermicompostagem Aplicada ao Tratamento de Lixiviado de Aterro Sanitário.** Porto Alegre, 1999.

REGATTIERI, C. R. **Quantificação da Emissão de Biogás em Aterro Sanitário - Estudo de Caso do Aterro Sanitário de São Carlos.** 2009. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009

ROHSTOFFE, F. N. et al. **Guia Prático do Biogás Geração e Utilização. Projeto Brasil Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético do Biogás.** Publicado pela Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), com o apoio do Ministério da Nutrição, Agricultura e Defesa do Consumidor da Alemanha. 5ª edição, Gülzow, 2010.

RUSSO, M. A. T. **Tratamento de Resíduos,** Coimbra, 2003.

SANTOS, A. C.; MACHADO, S. M.; CARVALHO, M. F.; NASCIMENTO, J. C. F. **Potencial bioquímico de metano em resíduos sólidos urbanos do aterro sanitário metropolitano centro, Salvador.**

SCHALCH, V.; L., W. C. A.; FERNANDES JÚNIOR, J. L. **Gestão E Gerenciamento de Resíduos Sólidos.** 2002. 97 f. Curso de Escola de

Engenharia de São Carlos, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

SEBRAE/SC, Santa Catarina em Números: Macrorregião Vale do Itajaí/Sebrae/SC._ Florianópolis: Sebrae/SC. 140p, 2013.

SOUZA, V. M. de. **Estudo de Sequestrantes de H₂S Para Sistemas de Produção de Óleo e Gás.** Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

SILVESTRE V.V, CAPANEMA M.A, NEVES. L. V, BELLI FILHO, P. CASTILHOS JR. A. B. **Avaliação do potencial de geração de biogás de um aterro sanitário com vistas à produção de energia elétrica.** VI Congresso Interamericano de Resíduos Sólidos, El Salvador, 2015.

SILVESTRE, V. V.. **Levantamento do Potencial Energético de Biogás do Aterro Sanitário de Brusque para Aproveitamento Sob a Forma de Energia Elétrica.** Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Engenharia Sanitária e Ambiental, UFSC, Florianópolis, 2015.

SPERLING, M. V. **Princípios básicos do tratamento de esgotos.** Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 211p, 1996.

STANO JÚNIOR, Â.; TIAGO FILHO, G. L.. **Energias Renováveis: Série Energias Renováveis.** Itajubá: 2007. 43 p.

TOLMASQUIM, M. T. Ministério de Minas e Energia (Org.). **Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos de Campo Grande, MS.** Rio de Janeiro, 2008.

U.S Army Corps of Engineers (1995), **Landfill off - gas collection and treatment system, Technical letter** nº 1110 - 1160, Depart. of The Army, Washington DC, USA.

U.S Environmental Protection Agency (2002), **Greenhouse gases and Global Warming Potential values, U.S Greenhouse Gas Inventory Program**, Office of Atmospheric Programs, Washington, USA.

WORLD BANK. **Handbook for the preparation of landfillgas to energy projects in Latin America and Caribbean**.World Bank. Oct. 2003. 125p.

ZAGO, S. **Potencialidade de produção de energia através do biogás integrada à melhoria ambiental em propriedades rurais com criação intensiva de animais, na região do Meio Oeste Catarinense**. Blumenau, Dissertação (Mestrado). Universidade Regional de Blumenau. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. 90p, 2003.

ZANETTE, A. L. **Potencial de Aproveitamento Energético do Biogás no Brasil**. Dissertação (Mestrado) - Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.